

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

***TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA LA
REDUCCIÓN DE LA TENSIÓN DE MODO
COMÚN EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS***

***DOCUMENTO-MEMORIA, METODOLOGIA, ASPECTOS
ECONÓMICOS Y CONCLUSIONES***

Alumno: Begoña González, Gaizka

Director: Kortabarria Iparragirre, Iñigo

Curso: 2020-2021

Fecha: 1 de Mayo de 2021

Resumen

El uso de convertidores conmutados en los vehículos eléctricos (EVs) introduce una tensión de modo común (CMV) que genera ciertos problemas. Entre ellos, destacan las corrientes de fuga que pueden llegar a deteriorar los rodamientos del motor, además de aumentar las interferencias electromagnéticas (EMI). Con el objetivo de prolongar la vida útil de los motores, es importante reducir los efectos negativos producidos por la CMV. Existen numerosas soluciones para hacer frente a la CMV, entre ellas destacan las técnicas de modulación por su sencilla y económica implementación.

En este trabajo se va a analizar el efecto de la CMV en las diferentes arquitecturas de convertidores de potencia, explicando las características, ventajas y desventajas de algunos convertidores de dos niveles y convertidores multinivel. Mediante la herramienta Matlab Simulink se va a estudiar el impacto de las técnicas de modulación en las numerosas topologías de convertidores.

Palabras clave: Vehículo eléctrico; Tensión de modo común; Matlab Simulink; Convertidores de potencia; Técnicas de modulación.

Laburpena

Ibilgailu elektrikoetan bihurtailu konmutatuak erabiltzeak arazoak eragiten dituen modu komuneke tentsioa sartzen du. Horien artean, motorren errodamenduak hondatu ditzakeen ihes korranteak nabarmentzen dira, interferentzia elektromagnetikoak (EMI) areagotzeaz gain. Motoreen bizitza luzatzeko, garrantzitsua da CMVren efektu negatiboak murriztea. CMVri aurre egiteko irtenbide ugari daude. Irtenbide horien artean, modulazio teknikak nabarmentzen dira beren aplikazio sinple eta ekonomikoagatik.

Lan honetan, CMVaren eragina aztertuko da potentzia bihurtailuaren arkitektura desberdinetarako, bi maila eta maila anitzeko bihurtailu batzuen ezaugarriak, abantailak eta desabantailak azalduz. Matlab Simulink tresnari esker, modulazio tekniken bihurteta topologia ugarien eragina aztertuko du.

Hitz-gakoak: Ibilgailu elektrikoa; Modu komuneke tentsioa; Matlab Simulink; Potentzia bihurtailuak; Modulazio teknikak.

Abstract

The use of switched converters in electric vehicles (EVs) introduces a common mode voltage (CMV) that causes certain problems. Among them stand out the leakage currents, that can deteriorate the motor bearings, as well as increasing electromagnetic interference (EMI). In order to extend the life of motors, it is important to reduce the negative effects of CMV. There are numerous solutions to deal with CMV, but the modulation techniques are highlighted between them for their simple and economic implementation.

In this project, it is analyzed the effect of CMV on different power converter architectures, explaining the characteristics, advantages and disadvantages of some two-level and multi-level converters. Thanks to Matlab Simulink it will be studied the impact of modulation techniques on numerous converter topologies.

Key-words: Electric vehicle; Common mode voltage; Matlab Simulink; Power converters; Modulation Techniques.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
NOMENCLATURA.....	8
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. CONTEXTO	13
3. OBJETIVOS Y ALCANCE	14
4. LOS CONVERTIDORES	15
4.1 INTRODUCCIÓN.....	15
4.2 EL CONVERTIDOR EN MODO FUENTE DE TENSIÓN (<i>VOLTAGE SOURCE CONVERTER</i>).....	15
4.3 LOS CONVERTIDORES MULTINIVEL.....	16
5. TÉCNICAS DE MODULACIÓN	23
5.1 INTRODUCCIÓN.....	23
5.2 TÉCNICAS BÁSICAS DE MODULACIÓN DEL VSC.....	23
5.3 TÉCNICAS DE MODULACIÓN DEL CHBC.....	26
5.4 CONCLUSIONES.....	27
6. LA TENSIÓN DEL MODO COMÚN.....	27
6.1 INTRODUCCIÓN.....	27
6.2 EN QUÉ AFECTA LA CMV	28
6.3 SOLUCIONES PARA LA CMV	28
6.4 TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL CMV EN EL VSC.....	30
6.5 TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL CMV EN MULTINIVEL.....	35
7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	39
7.1 MODELOS NPC.....	39
7.2 MODELOS CHBC.....	42
7.3 RESUMEN DE LAS SIMULACIONES.....	48
8. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL PROYECTO	48
8.1 PAQUETES DE TRABAJO	48
8.2 DIAGRAMA DE GANTT.....	50
9. PRESUPUESTO.....	51
9.1 HORAS INTERNAS.....	51
9.2 AMORTIZACIONES	51
9.3 GASTOS	51
9.4 PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	51
10. CONCLUSIONES	52
11. BIBLIOGRAFÍA.....	53

Índice de figuras

Figura 1-1: Tensiones de línea (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) en un convertidor VSC de dos niveles	12
Figura 1-2: Tensiones de línea (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) en un convertidor VSC multinivel	12
Figura 4-1: Flujo de energía en el vehículo eléctrico	15
Figura 4-2: Esquema de un convertidor VSC.....	16
Figura 4-3: Esquema de un convertidor NPC de tres niveles.....	17
Figura 4-4: Esquema de un convertidor NPC de cinco niveles	18
Figura 4-5: Esquema de un convertidor FCC de tres niveles	19
Figura 4-6: Esquema de un convertidor FCC de cinco niveles	20
Figura 4-7: Esquema genérico de un convertidor CHBC.....	21
Figura 5-1: Diagrama de bloques de una modulación SPWM	24
Figura 5-2: Mecanismo de funcionamiento del PWM	24
Figura 5-3: Diagrama espacio vectorial para un inversor de dos niveles	26
Figura 6-1: Esquema eléctrico de un inversor trifásico conectado a motor con su impedancia de modo común	28
Figura 6-2: Características de la técnica SV-PWM	31
Figura 6-3: Características de la técnica AZS-PWM3	32
Figura 6-4: Características de la técnica NS-PWM	33
Figura 6-5: Características de la técnica RS-PWM	34
Figura 6-6: Diagrama espacio vectorial de un inversor de tres niveles [19].....	36
Figura 6-7: Principio de funcionamiento de la modulación PD-PWM. La señal de color azul es la referencia.	37
Figura 6-8: Principio de funcionamiento de la modulación POD-PWM. La señal de color azul es la referencia.	38
Figura 6-9: Principio de funcionamiento de la modulación APOD-PWM. La señal de color azul es la referencia.	38
Figura 7-1: Tensiones de línea en un NPC de tres niveles utilizando PWM.....	39
Figura 7-2: Potencia total disipada en un NPC de tres niveles utilizando PWM.....	40
Figura 7-3: CMV en un NPC de tres niveles utilizando PWM.....	40
Figura 7-4: Tensiones de línea en un NPC de tres niveles utilizando SVPWM	41
Figura 7-5: Potencia total disipada en un NPC de tres niveles utilizando SVPWM	41
Figura 7-6: CMV en un NPC de tres niveles utilizando SVPWM.....	42
Figura 7-7: Tensiones de línea en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM..	43
Figura 7-8: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM.....	43
Figura 7-9: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM.....	44
Figura 7-10: Tensiones de línea en un convertidor CHBC utilizando POD-PWM.....	44
Figura 7-11: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM	45
Figura 7-12: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM	45
Figura 7-13: CMV ampliada en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM ...	46
Figura 7-14: Tensiones de línea en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM	46
Figura 7-15: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM.....	47
Figura 7-16: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM.....	47
Figura 8-1: Diagrama de Gantt del proyecto	50

Índice de tablas

Tabla 4-1: Ventajas y desventajas de los convertidores multinivel	22
Tabla 5-1: Expresión de los 8 vectores sobre el eje “d” de la Figura 3-3 [1]	25
Tabla 6-1: Tensión de modo común generada por los vectores de una modulación SVPWM en VSC	31
Tabla 6-2: Secuencia de vectores de las modulaciones trifásicas RCMV-PWM en el sector uno	35
Tabla 7-1: Parámetros de simulación de los modelos NPC.....	39
Tabla 7-2: Parámetros de simulación de los modelos CHBC	42
Tabla 7-3: Tabla resumen de los resultados de las simulaciones	48
Tabla 9-1: Partida horas internas del proyecto	51
Tabla 9-2: Partida amortizaciones del proyecto	51
Tabla 9-3: Partida costes del proyecto	51
Tabla 9-4: Presupuesto total del proyecto	51

Nomenclatura

f_c	Frecuencia de la señal triangular (Hz)
f_o	Frecuencia de la señal de referencia (Hz)
f_{VCM}	Frecuencia de la tensión de modo común (Hz)
m_f	Índice de modulación de la frecuencia
T_{sw}	Tiempo de conmutación (s)
V_{AB}	Tensión de rama A-B (V)
V_{AN}	Tensión de la fase A al punto neutro (V)
V_{BC}	Tensión de rama B-C (V)
V_{BN}	Tensión de la fase B al punto neutro (V)
V_{CA}	Tensión de rama C-A (V)
V_{cc}	Tensión de alimentación (V)
V_{cm}	Tensión del modo común (V)
V_{CN}	Tensión de la fase C al punto neutro (V)
V_{dc}	Tensión de alimentación continua (V)
V_{ref}	Tensión de referencia (V)
α	Eje de abscisas del espacio vectorial
β	Eje de ordenadas del espacio vectorial

Lista de acrónimos

AC	Alternate Current
APERT	Applied Electronics Research Team
APOD-PWM	Alternate Phase Opposition Disposition PWM
AZS-PWM	Active zero-state PWM
CHBC	Cascaded H-bridge multilevel converter
CMV	Common mode voltage
DC	Direct Current
EDM	Electric Discharge Machining
EMI	Electromagnetic Interference
EV	Electric Vehicle
FCC	Flying-Capacitors multilevel converter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
MRS-PWM	Modified Remote-State PWM
NPC	Neutral point diode-Clamped multilevel converter
NS-PWM	Near-State PWM
PD-PWM	Phase Disposition PWM
POD-PWM	Phase Opposition Disposition PWM
PWM	Pulse-Width Modulation
RCMV-PWM	Reduced Common Mode Voltage PWM
RS-PWM	Remote-State PWM
SoC	System on Chip
SPWM	Sinusoidal PWM
SV-PWM	Space Vectoring PWM
THD	Total Harmonic Distorsion

VSC

Voltage Source converter

1. Introducción

En la actualidad, la necesidad de los convertidores de potencia se ha vuelto imprescindible. Éstos se encargan de convertir la energía eléctrica de una forma eficiente y hacen de interfaz entre la carga y la fuente de energía. Entre todos los convertidores de potencia destaca el convertidor en modo fuente de tensión (*Voltage Source Converter, VSC*). Este convertidor permite la conversión de la tensión DC a AC y viceversa. Sus características lo hacen parte fundamental en los *drivers* de máquinas eléctricas. En la actualidad, la gran mayoría de motores o generadores que operan a velocidad y/o par variable incorporan un VSC. Ese es el caso de los vehículos eléctricos (*Electric Vehicle, EV*), los cuales emplean el VSC para alimentar el motor con la energía proveniente de la batería cada vez que es necesario acelerar el EV o cargar la batería con la energía proveniente del motor (en este caso generador) cada vez que sea necesario frenar el EV.

Los semiconductores más empleados en los VSCs son los MOSFET's e IGBT's. Debido a las altas energías que tienen que gestionar de forma eficiente, los semiconductores que componen los VSCs trabajan en conmutación. La operación en conmutación trae como consecuencia que las tensiones sintetizadas por los VSCs dispongan de un número de niveles discretos. Como resultado, teniendo en cuenta que el objetivo de los VSCs es generar tensiones senoidales, es necesario disponer de alguna técnica de modulación. En la actualidad, existen diferentes arquitecturas de VSC y técnicas de conmutación. La combinación de una determinada arquitectura y técnica de modulación busca optimizar las principales características de estos convertidores como son: el rendimiento, el contenido armónico, la tensión en modo común, etc.

El número de niveles que componen el voltaje de salida es un parámetro fundamental que guarda cierta relación con la calidad de la conversión de energía. Un mayor número de niveles equivale a mejores señales de salida. Por una parte, están los convertidores que generan únicamente dos niveles de voltaje a la salida o convertidores binivel, Figura 1-1: Tensiones de línea (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) en un convertidor VSC de dos niveles. Por otra parte, se encuentran los convertidores multinivel, los cuales son capaces de generar formas de onda a la salida con un número mayor de niveles que los inversores tradicionales de 2 niveles, Figura 1-2. A pesar de todo, un convertidor no deja de ser un conjunto de semiconductores que se activan y desactivan de manera ordenada siguiendo un patrón determinado por una modulación.

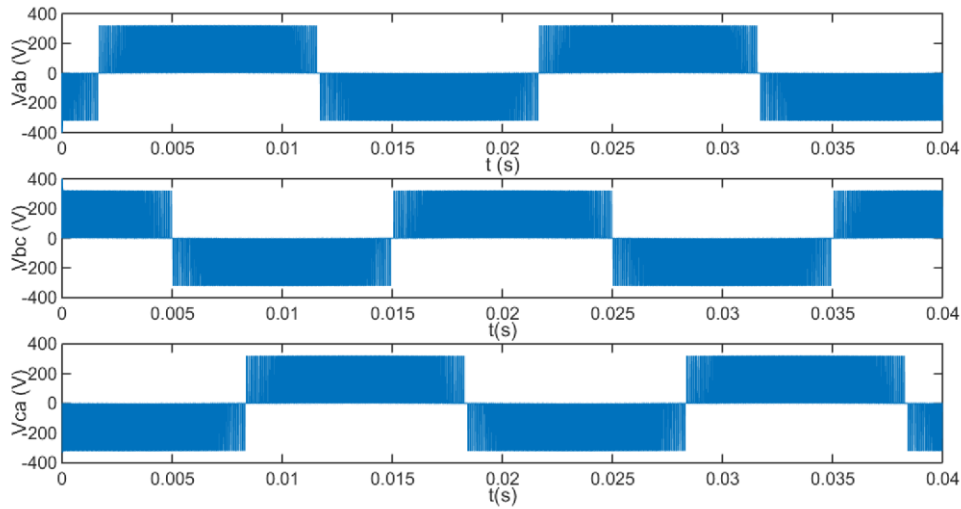


Figura 1-1: Tensiones de línea (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) en un convertidor VSC de dos niveles

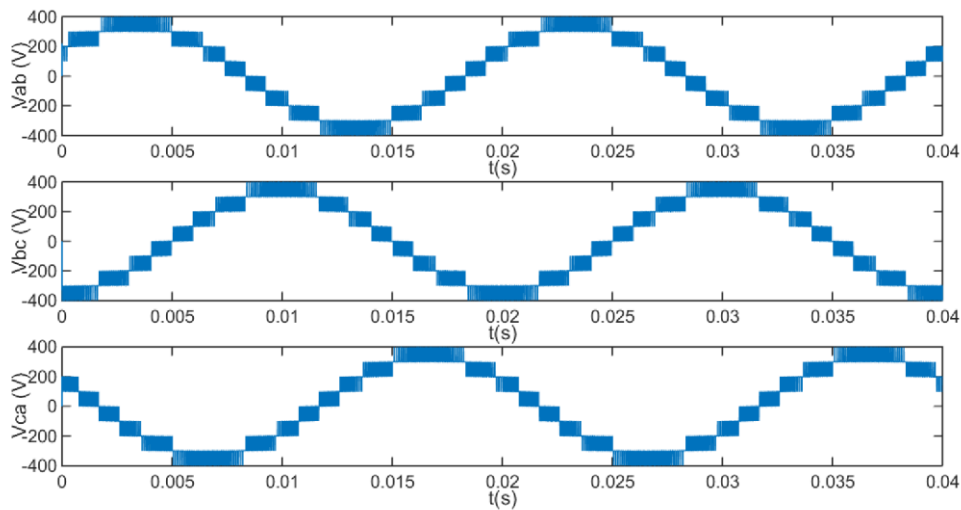


Figura 1-2: Tensiones de línea (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) en un convertidor VSC multinivel

Entre otros muchos parámetros, la velocidad y el par de un coche eléctrico son valores que pueden ser modificados en función de las necesidades del momento. Las técnicas de modulación permiten ajustar esos parámetros generando señales que activarán o desactivarán los interruptores del convertidor. Es por eso que la modulación juega un papel vital en un inversor, siendo un componente fundamental del sistema de control de un motor.

Los convertidores a su vez, debido a las modulaciones, generan voltaje de modo común. Este voltaje tiene una serie de efectos adversos en los rodamientos del motor, entre los que destacan la reducción de su vida útil o la generación de corrientes que podrían destruir elementos importantes del motor. Es por esto que se busca desarrollar convertidores de potencia que

traten de eliminar o simplemente minimizar el fenómeno de la tensión de modo común (*Common Mode Voltage*, CMV).

Este trabajo analiza y detalla las diferentes topologías y modulaciones posibles en convertidores VSC binivel y VSC multinivel, aplicando técnicas de modulación desarrolladas específicamente para minimizar la tensión de modo común generada en un motor eléctrico.

2. Contexto

Este proyecto se ha desarrollado en el seno del grupo de investigación APERT (*Applied Electronics Research Team*). Este grupo está formado por profesores, investigadores predoctorales y doctorales de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, así como estudiantes de maestría y grado. Las principales actividades que realiza el grupo APERT son:

- Colaboración en proyectos de investigación y desarrollo (I + D) financiados por diferentes administraciones a través de convocatorias públicas.
- Proyectos de I + D en línea con el tema del equipo de investigación, como un contrato para empresas u organizaciones.
- Formación para empresas relacionadas con las líneas de investigación del grupo APERT.
- Consultoría tecnológica, estudios técnicos o informes relacionados con el equipo de investigación APERT.
- Tesis doctorales, publicaciones en revistas internacionales, conferencias y patentes.

Con esto en mente, las áreas de investigación del grupo son dobles. Por un lado, circuitos reconfigurables y SoC (*System-on-Chip*) y, por otro lado, circuitos de control para convertidores de potencia. Específicamente, este trabajo se centra en el desarrollo e investigación de circuitos de control de convertidores de potencia.

Por el momento, las líneas de investigación de APERT en electrónica de potencia se centran en las siguientes áreas:

- Electrónica para el sistema de propulsión de vehículos eléctricos: esta sección desarrolla mejoras en el rendimiento, el control y el sistema de enfriamiento de los inversores y convertidores de potencia utilizados en la propulsión de vehículos eléctricos.
- Transmisión y distribución de corriente continua: en esta área, se desarrollan sistemas de transmisión y distribución de energía marina.

Específicamente, lo que se ha logrado en este proyecto fin de grado se implementará más adelante en una plataforma en tiempo real para los sistemas de propulsión de vehículos eléctricos. Gracias a los resultados obtenidos en este proyecto, el grupo de investigación APERT dispondrá de más información sobre las arquitecturas de convertidores que reducen la tensión de modo común.

3. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es simular y comparar una serie de convertidores de potencia con diferentes técnicas de modulación para reducir o minimizar la tensión de modo común en los motores eléctricos. Con el fin de prolongar la vida útil de un motor es importante reducir los efectos negativos de la CMV, por ese motivo, en este proyecto se trata de minimizar las corrientes de fuga y las interferencias electromagnéticas (EMI) que muchas veces pueden llegar a deteriorar los rodamientos del motor. El objetivo principal está acompañado de otros objetivos parciales, como son:

- Adquirir un amplio conocimiento sobre los diferentes convertidores y técnicas de modulación, enfocados siempre a su uso en vehículos eléctricos. Los artículos y tesis científicas nos van a facilitar esta tarea.
- Diseñar modelos en Matlab/Simulink que sean capaces de mostrar el comportamiento real del conjunto convertidor-motor, sin necesidad de tener que implementarlos físicamente. Se van a emplear modelos previamente diseñados por el grupo APERT. Éstos, están basados en dispositivos reales.
- Obtener los resultados de los modelos implementados en la simulación en tiempo real y comparar los resultados para extraer las conclusiones.

Por lo tanto, el alcance del proyecto es proporcionar al grupo de investigación resultados y modelos validados de convertidores para la reducción del modo común.

4. Los convertidores

4.1 Introducción

Un inversor transforma la energía DC en AC, es decir, extrae la energía (DC) de una fuente de continua y la transforma en (AC) para entregarla a una carga. Cuando conectamos un dispositivo de estas características a un motor, no solo debe realizar la función de inversor, también debe ser capaz de hacer la operación inversa, es decir, una conversión AC-DC. De esta forma, se consigue mejorar la eficiencia total, puesto que la energía no se quema en forma de calor en los discos de freno, sino que es devuelta a la batería, dando lugar al concepto de frenado regenerativo, Figura 4-1.

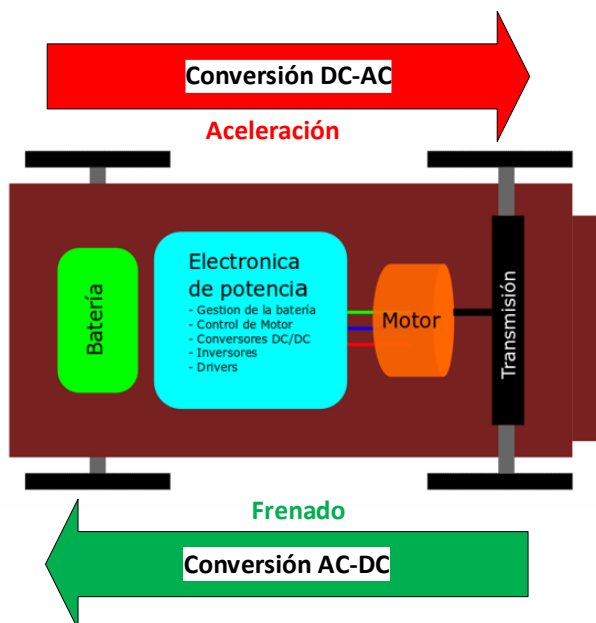


Figura 4-1: Flujo de energía en el vehículo eléctrico

Todos los convertidores que se presentan en este trabajo cumplen los requisitos y necesidades para su implementación en el vehículo eléctrico.

4.2 El convertidor en modo fuente de tensión (*Voltage Source Converter*)

4.2.1 Descripción de la topología

El modelo más simple de un convertidor de potencia es el *Voltage Source Converter* (VSC) binivel, el cual se compone de 2 niveles y 3 fases. La arquitectura VSC está compuesta por seis transistores IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que funcionan como interruptores (S1-S6) y que conmutan de forma controlada para producir un sistema trifásico de tensiones alternas a partir de un bus de tensión continua (VDC). El convertidor se divide en tres ramas con dos

transistores en cada una, los puntos a , b y c son las salidas de cada una de las ramas. Entre los voltajes de cada rama (v_{AB} , v_{BC} , v_{CA}) se obtienen los voltajes de línea Figura 4-2. Éstos, se encuentran desfasados 120° y al conectar una carga en estrella dan lugar a las tensiones fase a neutro (v_{AN} , v_{BN} , v_{CN}). El resultado de la conmutación de los interruptores genera una señal de voltaje a la salida del sistema que puede tomar una amplitud de $+V_{DC}/2$, $-V_{DC}/2$ o 0 V. En la Figura 1-1 se pueden apreciar los distintos niveles de tensión generados a la salida por un convertidor de estas características.

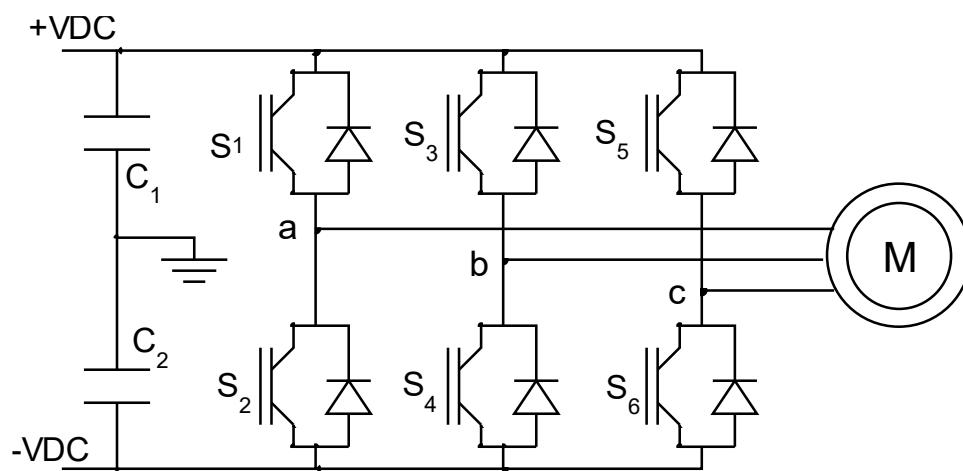


Figura 4-2: Esquema de un convertidor VSC

Las ventajas de esta topología son la sencillez en su diseño y la facilidad a la hora de implementarlos. Por ese motivo los convertidores VSC se emplean a menudo en aplicaciones que no requieren altas prestaciones, por ejemplo, en aplicaciones de baja y media potencia.

No obstante, las señales a la salida del sistema no tienen la calidad suficiente debido a que presentan gran distorsión armónica. Por eso, para mejorar la calidad de la onda de un VSC se debe aumentar la frecuencia de conmutación, produciéndose así mayores pérdidas [2]. Las pérdidas de conmutación producidas al aumentar la frecuencia de conmutación limitan la implementación de los convertidores de 2 niveles en aplicaciones de media y alta potencia.

4.3 Los convertidores Multinivel

4.3.1 Introducción

Los convertidores multinivel han sido de gran interés en aplicaciones industriales de alta potencia. La arquitectura de los convertidores multinivel permite repartir la tensión en varios niveles, reduciendo así el estrés en los conmutadores del circuito. A medida que se aumenta el número de niveles del convertidor, aumenta el número de componentes y su volumen y

disminuye la distorsión armónica de la corriente de salida. La estructura habitual de un convertidor multinivel debe de tener el menor número de componentes de conmutación posibles, debe ser capaz de convertir altas tensiones de entrada en altas tensiones de salida y sobre todo debe de tener una frecuencia no muy elevada de conmutación para evitar el estrés de los semiconductores. En este trabajo se van a emplear topologías de tres y cinco niveles, obteniendo una señal escalonada que se aproxima a una tensión sinusoidal. Los convertidores multinivel producen una tensión de modo común más pequeña que en los VSC de 2 niveles.

4.3.2 Descripción de los tres tipos principales

Los tipos de convertidores multinivel más empleados son:

- Neutral point diode-Clamped multilevel converter (NPC)
- Flying-Capacitors multilevel converter (FCC)
- Cascaded H-bridge multilevel converter (CHBC)

NPC (Neutral point diode-clamped multilevel converter)

Un NPC-MC de (m -niveles) consiste en un convertidor de ($m-1$) condensadores en el bus de DC que producen m niveles en los voltajes de las fases, Figura 4-3. Su misión principal es la de inyectar una cantidad significativa de armónicos en el punto neutro del convertidor para mantener la tensión VDC a su valor nominal. El correcto bloqueo de los diodos permite obtener la tensión correcta a la salida. A medida que aumentamos el número de niveles también aumentamos el número de diodos y de condensadores en el diseño.

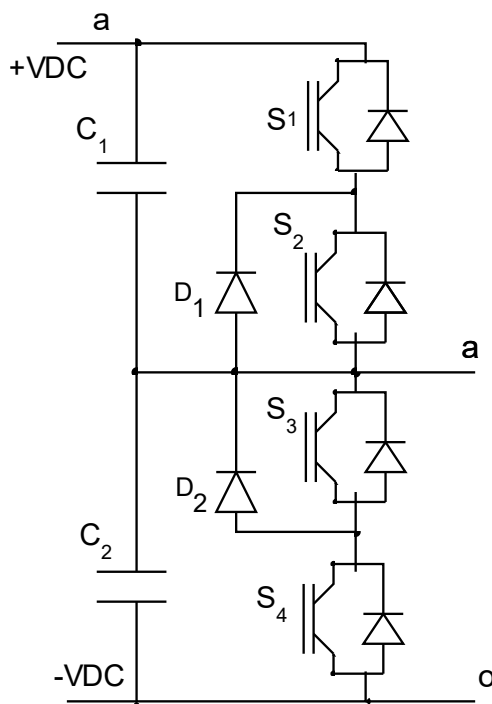


Figura 4-3: Esquema de un convertidor NPC de tres niveles

Por otra parte, el modelo de 5 niveles del NPC, consiste en 4 condensadores, C_1 , C_2 , C_3 y C_4 , donde la tensión en cada condensador es de $V_{cc}/4$, Figura 4-4. Un NPC-MC de 5 niveles es muy superior al NPC-MC de 3 niveles y se implementa en sistemas de alta tensión porque en el NPC-MC de 3 niveles la tensión bloqueada por los semiconductores limita el diseño[3].

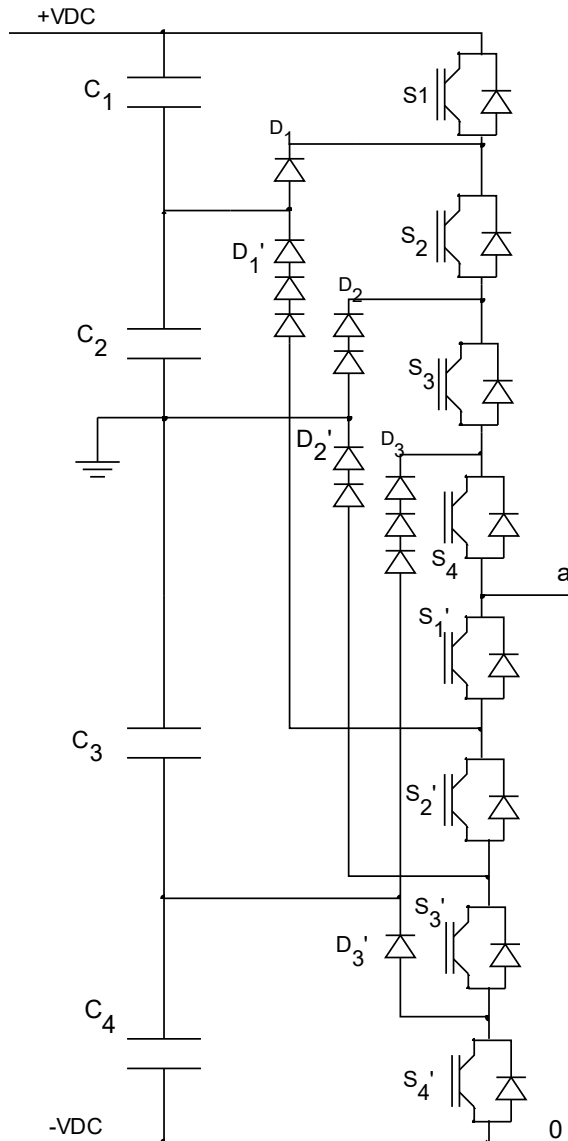


Figura 4-4: Esquema de un convertidor NPC de cinco niveles

A pesar de su simple diseño, el NPC responde al sistema con un alto rendimiento. Por otra parte, la tensión en los dispositivos de conmutación es bastante reducida debido a que los diodos bloquean parte de esa tensión y así se obtiene una buena THD y una buena respuesta dinámica.

Como contrapartida, a medida que se aumenta el número de niveles del convertidor, también aumenta la complejidad para equilibrar los condensadores de la tensión de alimentación.

FCC (Flying-Capacitors multilevel Converter)

El mecanismo de funcionamiento del FC-MC es similar al del NPC-MC, pero en esta ocasión se sustituyen los diodos por condensadores. Fruto de este cambio en la topología FCC únicamente se emplean condensadores. Se pueden distinguir 2 clases de condensadores según su función. Por una parte, el condensador “C1” Figura 4-55; que será el condensador donde se fijará la tensión resultante de la conmutación de los semiconductores. Por otra parte, tenemos múltiples condensadores auxiliares; los cuales se cargan y descargan con el objetivo de mantener un voltaje determinado en el condensador “C1”. A pesar de necesitar una técnica de conmutación diferente a la del NPC-MC, las tensiones a la salida del sistema FCC son muy similares a los de un NPC de 3 niveles.

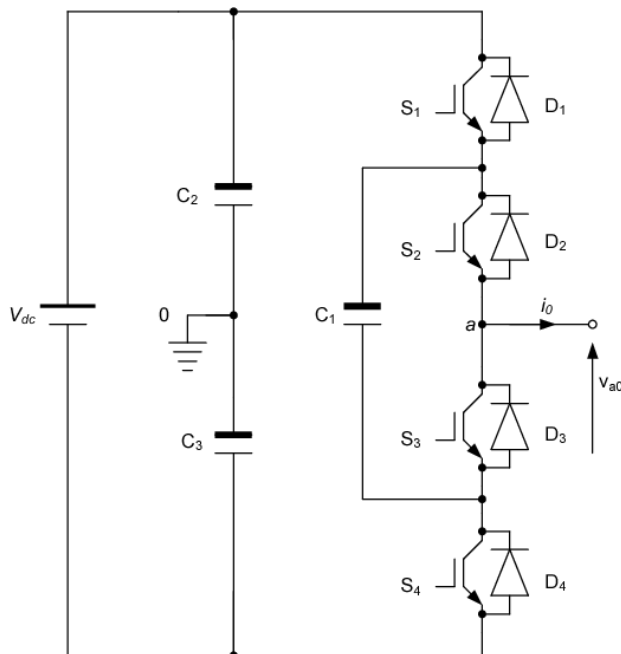


Figura 4-5: Esquema de un convertidor FCC de tres niveles

A medida que el número de niveles aumenta, la complejidad para controlar el FCC también aumenta. En concreto, aumenta el número de estados de conmutación redundantes. Estos estados tienen diferentes efectos en el voltaje del condensador y por eso se requiere de una mayor atención en el nivel del convertidor. De todas formas, si se controlan los estados de conmutación redundantes, se puede mantener el valor del voltaje en “C1”. En el caso del FCC de 5 niveles el hecho de disponer de un número mayor de estados redundantes que en el caso del de 3 niveles, permite diseñar la conmutación de los semiconductores con más margen y de esta manera se pueden obtener mejores resultados, Figura 4-6.

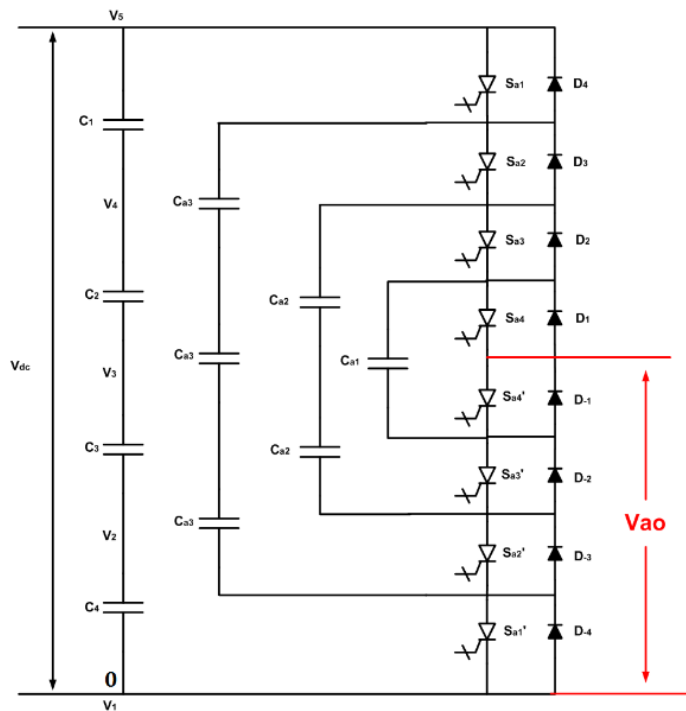


Figura 4-6: Esquema de un convertidor FCC de cinco niveles

Una de las principales ventajas es el uso de las redundancias en las fases. Estas redundancias tienen la capacidad de cargar y descargar los condensadores según sus necesidades instantáneas. También pueden ser ajustados mediante varios parámetros como el consumo de potencia, para balancear el voltaje. De esta manera los dispositivos sufren un menor estrés y se consigue obtener una buena THD del voltaje de salida usando un filtro de salida más pequeño [3].

Por otro lado, a medida que se aumenta el número de niveles el control del sistema se vuelve más complejo y se requiere de un gran número de condensadores electrolíticos para soportar la arquitectura. Su baja eficiencia de conmutación, su complejidad y su elevado coste sitúan al FCC algo por debajo del NPC [12].

CHBC (Cascaded H-Bridge multilevel Converter)

Un CHBC se forma conectando varios convertidores de medio puente en serie. Cada convertidor de medio puente tiene su propia alimentación de continua. Los niveles de tensión que se obtienen de cada convertidor son +Vdc, 0 y -Vdc, los cuales se regulan mediante el correcto patrón de encendido de los interruptores. Para obtener +Vdc se encienden S1 S4 y para obtener -Vdc se encienden S2S3. Al estar conectados en serie todos los convertidores, la tensión de salida total es la resultante de la suma de las tensiones en cada uno de los convertidores.

$$V_{an} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + \dots + V_{a[(m-1)/2]}.$$

Para un convertidor CHB de “n” niveles el número de convertidores independientes se calcula mediante la siguiente expresión: $n=2s+1$, donde “s” es el número de fuentes DC, Figura 4-7.

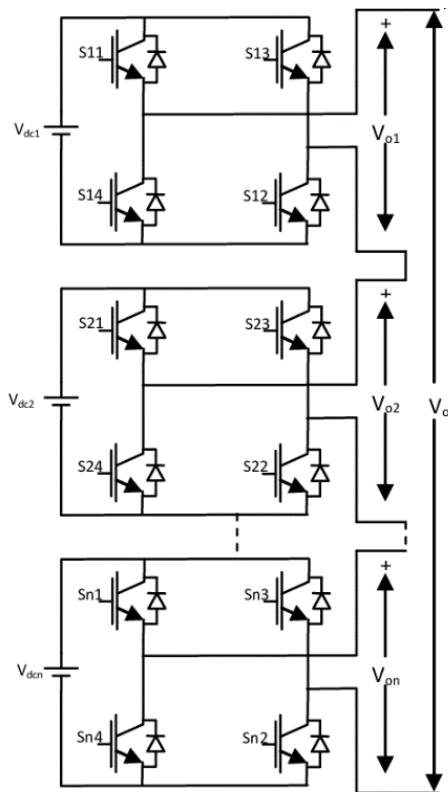


Figura 4-7: Esquema genérico de un convertidor CHBC

Un CHBC-MC de 5 niveles únicamente está formado por la agrupación en serie de 2 módulos por cada fase, cada uno de ellos compuesto por 4 conmutadores, sumando un total de 24 conmutadores en todo el sistema trifásico. El patrón de encendido de cada uno de los módulos es independiente del otro y de la misma manera también son diferentes los tiempos de activación de los switches.

El número de componentes que se usan en una arquitectura CHBC-MC es inferior a las otras 2 topologías que se presentan en este trabajo.

Tiene como inconveniente principal el hecho de tener que usar fuentes de alimentación de tensión continua independientes.

En la Tabla 4-1 se pueden apreciar las principales ventajas y desventajas de los convertidores NPC, FCC y CHBC.

Tabla 4-1: Ventajas y desventajas de los convertidores multinivel

	Ventajas	Desventajas
NPC	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño Simple • Voltaje reducido en los interruptores, buen espectro armónico y buena respuesta dinámica [17] 	<ul style="list-style-type: none"> • A medida que se aumenta el nivel del convertidor, se aumenta el número de diodos de bloqueo • Alta complejidad para balancear el condensador de alimentación a medida que aumenta el número de niveles [12] • No soporta altos voltajes, especialmente los superiores a 4 kV [14]
FCC	<ul style="list-style-type: none"> • La redundancia en las fases permite balancear el nivel de voltaje y reducir el estrés en los semiconductores [15] • THD más que aceptable • Menor filtro de salida • Menor número de componentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema complejo de controlar a medida que aumentan los niveles • Requiere de un elevado número de condensadores electrolíticos • Baja eficiencia de conmutación [12] • Alto coste de instalación
CHBC	<ul style="list-style-type: none"> • Muy versátiles [16] • Mejor respuesta ante errores [16] • Buena respuesta a sistemas de muy alta tensión • Bajo coste 	<ul style="list-style-type: none"> • Usan fuentes DC independientes [12]

4.3.3 Conclusiones

En comparación con el FC-MC y el NPC-MC, el CHBC-MC es el más robusto de todos los convertidores gracias a su alta tolerancia a fallos [3]. El CHBC-MC es capaz de seguir funcionando con una menor potencia a pesar de tener algún problema en alguno de sus módulos.

Los convertidores CHBC resultan ser la opción más económica debido a que requieren de un menor número de dispositivos semiconductores. Son convertidores preparados para ser usados en aplicaciones de alta potencia, ya que son los que mejor resultado presentan ante altas tensiones de alimentación.

El CHBC tiene un alto potencial en vehículos eléctricos donde el acumulador está formado por “Packs” de baterías o baterías independientes.

5. Técnicas de modulación

5.1 Introducción

Entre otros muchos parámetros, la velocidad y el par de un coche eléctrico son valores que pueden ser modificados en función de las necesidades del momento. Además de generar un patrón de activación de los semiconductores, la modulación consigue obtener una señal de salida escalonada cuya componente fundamental es la señal de referencia para el modulador. Existe una gran variedad de modulaciones, pero entre ellas la modulación más conocida y básica de todas es la modulación SPWM.

5.2 Técnicas básicas de modulación del VSC

Una de las técnicas de modulación más empleadas en los convertidores de 2 niveles es la PWM. Su principal ventaja es la sencillez en su implementación y sus inconvenientes más destacados son que no se adaptan bien a la respuesta dinámica en cargas no lineales y que poseen grandes pérdidas de conmutación cuando se quiere obtener una baja distorsión armónica [1].

En cualquier caso, debido a su bajo precio y simplicidad respecto a otros convertidores, los VSC pueden usarse en algunas aplicaciones en las que no se requiera una gran eficiencia o respuesta del sistema.

5.2.1 SPWM

La técnica PWM, también conocida como modulación por ancho de pulsos, es una de las técnicas más empleadas y es la base para el desarrollo de muchas otras modulaciones. El funcionamiento del PWM consiste en la variación de 2 parámetros: El ciclo de trabajo y la frecuencia. El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo que la señal está en un estado alto (encendido) como un porcentaje del tiempo total que se tarda en completar un ciclo. La frecuencia determina cómo de rápido el PWM completa un ciclo y, por lo tanto, cómo de rápido cambia entre los estados alto y bajo. Es una técnica de modulación en la que el ciclo de trabajo de la señal pulsante está controlado por otra forma de onda [4].

La técnica PWM sinusoidal (Sinusoidal PWM, SPWM) es un método en el que una señal portadora (triangular) y una señal sinusoidal de referencia se comparan para obtener una señal de salida modulada, Figura 5-1.

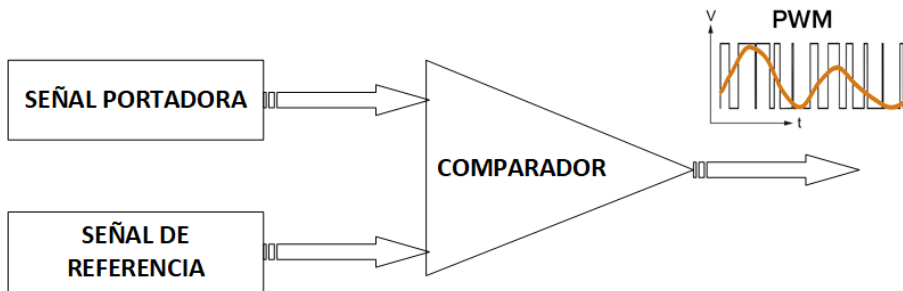


Figura 5-1: Diagrama de bloques de una modulación SPWM

La señal de salida es una señal cuadrada cuya anchura es proporcional a la amplitud de la señal sinusoidal de referencia, Figura 5-2.

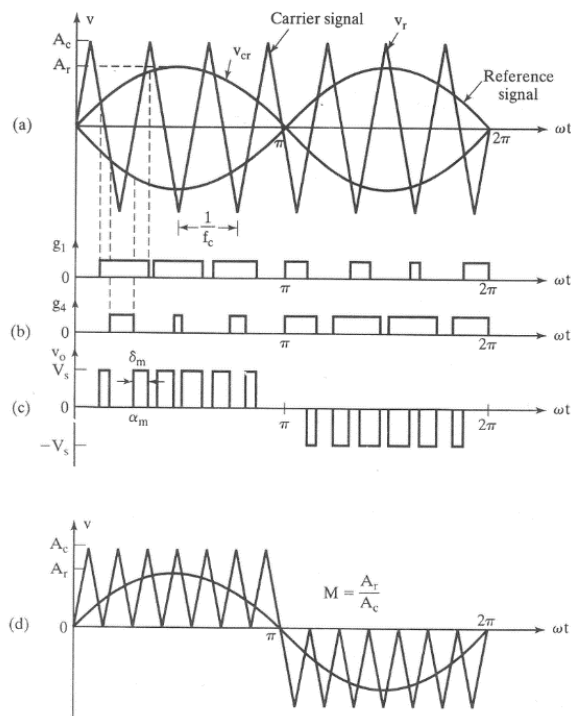


Figura 5-2: Mecanismo de funcionamiento del PWM

En un sistema trifásico se usan tres señales sinusoidales desfasadas entre sí ciento veinte grados. El ancho del pulso de salida depende del índice de modulación, el cual es un parámetro que relaciona las amplitudes de la señal portadora y la de referencia. Por otra parte, el índice de modulación de frecuencia se calcula como $m_f = \frac{f_c}{f_o}$, siendo " f_c ", la frecuencia de la señal triangular y f_o la frecuencia de la señal de referencia. Para conseguir buenos resultados en la modulación, $f_c \gg f_o$.

5.2.2 SV-PWM

Hay otra técnica basada en PWM que ofrece un voltaje de salida capaz de reducir los armónicos. La técnica de modulación vectorial (*Space Vector PWM*, *SV-PWM*) es un método muy complejo que requiere de una gran capacidad de computación, independientemente del tiempo de encendido de los dispositivos [4].

En un sistema trifásico estándar existen ocho estados de conmutación, de los cuales dos de ellos (V0 y V7), son estados nulos. Se tratan de estados nulos porque generan una tensión nula.

En la Tabla 5-1 se pueden ver la expresión de los ocho vectores respecto al eje “d”.

Tabla 5-1: Expresión de los 8 vectores sobre el eje “d” de la Figura 5-3 [1]

Vector	Estados interruptores	Vab	Vbc	Vca	Expresión SVV
V0	(000)	0	0	0	$\vec{V}_0 = 0V$
V1	(100)	+Vdc	0	-Vdc	$\vec{V}_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle 0^\circ$
V2	(110)	0	+Vdc	-Vdc	$\vec{V}_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle -60^\circ$
V3	(010)	-Vdc	+Vdc	0	$\vec{V}_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle -120^\circ$
V4	(011)	-Vdc	0	+Vdc	$\vec{V}_4 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle -180^\circ$
V5	(001)	0	-Vdc	+Vdc	$\vec{V}_5 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle -240^\circ$
V6	(101)	+Vdc	-Vdc	0	$\vec{V}_6 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}\angle -300^\circ$
V7	(111)	0	0	0	$\vec{V}_7 = 0V$

Los vectores dividen el plano en seis sectores. Dependiendo del sector en el que se encuentre el voltaje, se escogen dos vectores adyacentes. Las representaciones binarias de los dos vectores adyacentes difieren en un solo bit, de esta manera, solo uno de los semiconductores superiores conmuta cuando el patrón de conmutación cambia de un vector adyacente a otro. La Figura 5-3 muestra la representación binaria y SV de los vectores para un inversor de dos niveles.

La amplitud de la tensión de salida podría controlarse reduciendo el tiempo de aplicación de los vectores e introduciendo tiempos con vectores nulos (V_n) de por medio. Por ejemplo, una secuencia posible es la compuesta por los vectores $V_6, V_n, V_1, V_n, V_2, V_n, V_3, V_n, V_4, V_n, V_5, V_n$ donde la suma de todos los tiempos durante los que se aplica cada vector continuaría siendo igual al periodo de la señal que se desea generar. “ V_n ” puede ser tanto el vector V_0 como el V_7 , y la elección de uno de los dos puede hacerse siguiendo diversos criterios [1]. El criterio puede variar dependiendo del dispositivo utilizado, aunque por lo general se intenta minimizar el número de conmutaciones cuando cambiamos del vector actual a uno nulo.

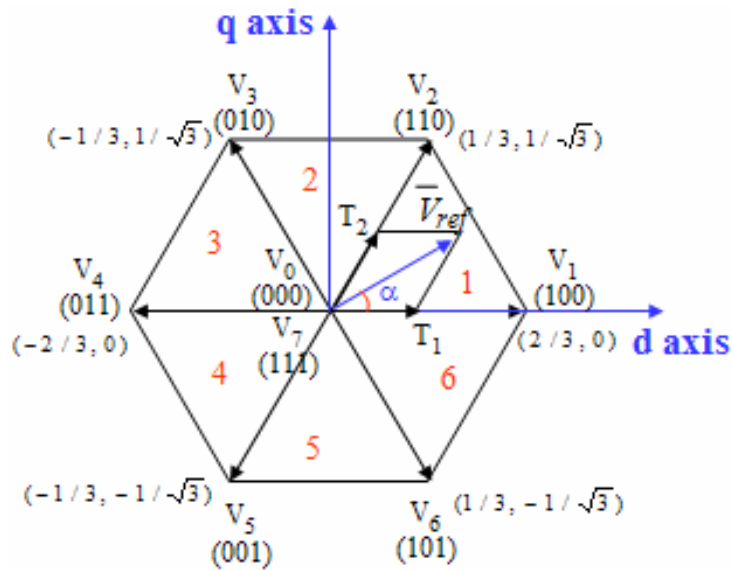


Figura 5-3: Diagrama espacio vectorial para un inversor de dos niveles

5.3 Técnicas de modulación del CHBC

5.3.1 Modulaciones basadas en portadoras (SPWM)

En arquitecturas CHBC, las modulaciones basadas en PWM, son las modulaciones que mejores resultados presentan en comparación con las demás. De hecho, las topologías CHBC, no permiten usar muchos tipos de modulaciones, como la modulación espacio-vectorial que se explica en el siguiente apartado. A pesar de todo, pese a que tenga una importante limitación software, son ideales para todo tipo de técnicas basadas en portadoras, como es el caso de SPWM.

El convertidor de tres niveles necesita una portadora y una referencia en este caso, el número de portadoras de onda triangular es igual a $m-1$, donde m es el número de niveles de voltaje. Para un inversor trifásico de tres niveles, esto significa que se necesitan dos portadoras triangulares y una referencia sinusoidal [10]. El desplazamiento de fase en cualquiera de las dos ondas portadoras adyacentes está dado por:

$$\theta = \frac{360^\circ}{(m-1)} = \frac{360^\circ}{(3-1)} = 180^\circ$$

Las señales moduladoras consisten generalmente en tres ondas sinusoidales con amplitud y frecuencia ajustables [10]. Las señales de puerta se generan al comparar las moduladoras con las ondas portadoras.

5.4 Conclusiones

Las modulaciones basadas en portadoras son capaces de conseguir unas señales de salida con muy baja distorsión armónica y con una tensión de modo común bastante reducida. Además, son la mejor opción para implementarlas en topologías CHBC.

6. La tensión del modo común

6.1 Introducción

El uso de inversores conmutados en los vehículos eléctricos introduce una tensión de modo común que genera ciertos problemas. Si el motor estuviera directamente alimentado por una red trifásica sinusoidal, se obtendrían 3 tensiones equilibradas y simétricas, siendo la suma fasorial de cada una de las tensiones línea-tierra igual a cero. Sin embargo, cuando el motor se alimenta a través de un inversor con modulación PWM, dicha suma es distinta a cero, apareciendo una tensión (CMV) en el conjunto motor-inversor, Figura 6-1.

$$v_{CM(t)} = \frac{v_{a0}(t) + v_{b0}(t) + v_{c0}(t)}{3}$$

Las variaciones rápidas (alta dv/dt) de esta tensión también generan una corriente pulsante de modo común (*Common Mode Voltage, CMV*).

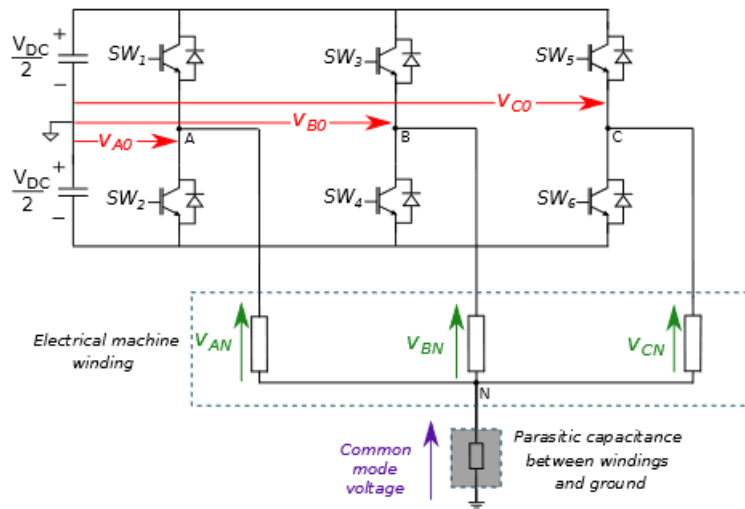


Figura 6-1: Esquema eléctrico de un inversor trifásico conectado a motor con su impedancia de modo común

6.2 En qué afecta la CMV

Además de la CMC, la CMV produce otras corrientes que circulan por rutas capacitivas a través de los rodamientos del motor, pudiendo dañar e incluso destruir estos elementos. Las principales son: corrientes de descarga capacitiva, corrientes de rotor a tierra, corrientes circulantes de alta frecuencia y corrientes EDM (*Electric Discharge Machining*). Del mismo modo, las oscilaciones de alta frecuencia de estas corrientes son una importante fuente de emisiones electromagnéticas (EMI) [6].

Con el fin de prolongar la vida útil de los motores, es importante reducir los efectos negativos producidos por la CMV. Existen dos tipos de soluciones que permiten reducir los efectos perjudiciales de la tensión de modo común: activas y pasivas.

6.3 Soluciones para la CMV

6.3.1 Soluciones activas

Tienen como objetivo reducir la CMV antes de que produzca efectos dañinos en el conjunto inversor-motor. Entre estas soluciones destacan filtros, las topologías de convertidores y las técnicas de modulación.

Se pueden encontrar técnicas de modulación específicas que permiten reducir la CMV. En concreto, las técnicas de modulación Reduced Common Mode Voltage (RCMV-PWM) tienen como objetivo evitar la aplicación de vectores nulos. Dentro de este grupo, las más comunes son Active Zero-State (AZ-PWM), Near-State (NS-PWM) y Remote-State (RS-PWM), cuya principal ventaja radica en que no es necesario modificar la estructura del motor o del hardware. Como

contrapartida, su uso produce una serie de desventajas, tales como la reducción del rango de tensión utilizable, o el aumento de la distorsión armónica (THD), entre otros problemas [9].

6.3.2 Soluciones pasivas

Por otra parte, las soluciones pasivas, aunque no combaten el problema de raíz, minimizan los problemas derivados de ésta, proporcionando soluciones para que la corriente no circule a través de los rodamientos.

Dentro de este grupo existen varias soluciones industrializadas basadas en el aislamiento de corriente [9].

- Blindaje de Faraday

Consiste en blindar un conductor entre el rotor y el estator, el cual bloquea la corriente del inversor con una barrera capacitiva, evitando que ésta sea inducida en el eje.

- Rodamiento aislado

Utilizando un material aislante, se evita que la corriente del eje se descargue hacia la carcasa del estator a través de los rodamientos.

- Rodamiento cerámico o híbrido

Este tipo de rodamiento tiene, o bien el elemento rodante cerámico y la pista de acero, o bien ambos elementos cerámicos.

- Grasa conductora

Esta grasa contiene partículas conductoras que proporcionan un recorrido continuo a través del rodamiento, purgando las descargas dañinas producidas por las tensiones del eje.

- Acoplamiento de carga mecánica aislado

Esta técnica evita posibles daños en la carga accionada, aislando las corrientes que pudieran circular hacia la misma.

Otra serie de técnicas pasivas pretenden proporcionar una ruta alternativa de la corriente hacia tierra [9].

- Cable blindado

Esta técnica facilita que las corrientes generadas por la CMV regresen al inversor mediante cables de “protección a tierra” simétricos, los cuales proporcionan una ruta de baja impedancia.

- Cables de conexión a tierra

Es importante que existan puntos de conexión a tierra adecuados para que la corriente fluya, para ello se suelen crear cables de finos filamentos, tanto en el motor, como en el inversor o en la carga, para que las corrientes de alta frecuencia deriven a tierra.

- Escobillas

Esta opción es mejor que el aislamiento, ya que proporciona una ruta de descarga alternativa y evita las corrientes de los rodamientos.

- Anillo de conexión del eje a tierra

Al igual que las escobillas, esta solución proporciona una trayectoria de muy baja impedancia entre el eje y la carcasa del motor, evitando la circulación por los rodamientos del motor.

Este trabajo se centra en el uso de las técnicas de modulación como solución más eficaz para reducir el problema de la CMV. En algunos casos, la solución o soluciones requeridas excederán lo que se puede abordar en el diseño de un motor. En otros casos, es posible que se requiera combinar varias de las soluciones existentes para lograr altos niveles de fiabilidad en el conjunto motor-conversor. Para analizar el comportamiento de la CMV en arquitecturas CHBC se van a crear diferentes modelos en “*Matlab Simulink*”. Cada modelo se puede dividir en dos bloques fundamentales: bloque software y bloque hardware. La parte software se compone únicamente por la técnica de modulación del modelo correspondiente. En cambio, el bloque hardware es común en todos los modelos y está formado por: baterías, condensadores de alimentación, IGBT's, sistema de refrigeración y carga inductiva.

6.4 Técnicas de modulación para la reducción del CMV en el VSC

Entre todas las soluciones posibles que se plantean para reducir la tensión del modo común, las técnicas de modulación son claramente la mejor opción. Presentan un menor coste y no necesitan de un hardware adicional a la hora de su implementación. Actualmente existen diversos programas de simulación que permiten implementar estas modulaciones y de esta forma verificar su funcionamiento antes de su implementación.

6.4.1 La CMV cuando se usa SV-PWM

La modulación SV-PWM se basa en la conversión de las tensiones trifásicas de referencia a un equivalente de dos fases, mediante la transformada de Clarke. Al realizar la conversión, existen ocho estados posibles en los que se puede operar el convertidor. Cada estado se corresponde con un vector, siendo seis vectores activos (V_1 - V_6) y dos vectores nulos (V_0 y V_7). Para formar el vector de referencia (V_{ref}) se utilizan dos vectores adyacentes y los dos vectores nulos.

En el caso de SV-PWM, la Figura 6-2(a) muestra la división del espacio vectorial, la Figura 6-2(b) los vectores que forman V_{ref} , la Figura 6-2(c) el rango lineal de la modulación y la Figura 6-2(d) la forma de onda de la CMV.

El rango lineal determina el margen de valores entre cero y uno que puede tomar el índice de modulación. En este caso, SV-PWM aprovecha toda la capacidad de su rango lineal.

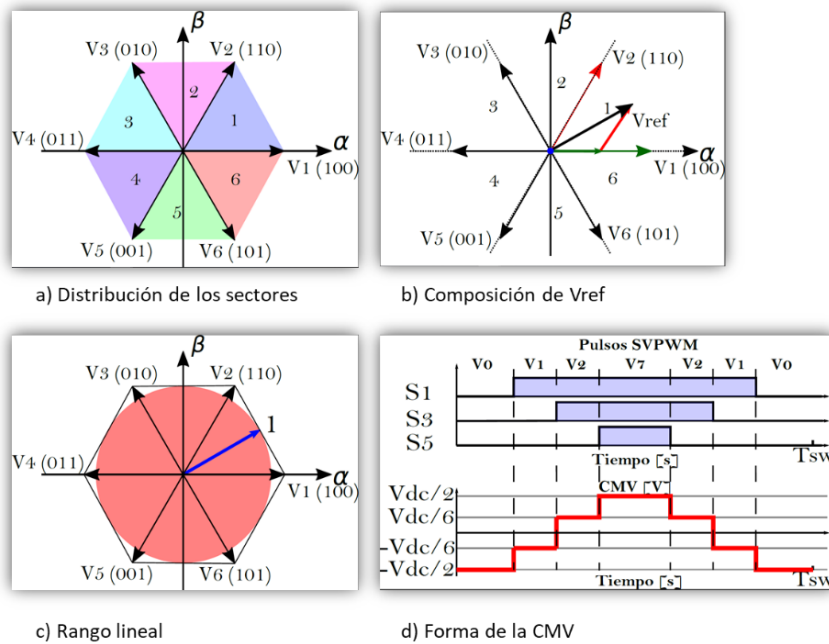


Figura 6-2: Características de la técnica SV-PWM

A su vez, éstos vectores pueden agruparse según el nivel de CMV que generan, siendo la CMV generada por SV-PWM especialmente elevada cuando se aplican vectores nulos, Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Tensión de modo común generada por los vectores de una modulación SV-PWM en VSC

Vectores	Nivel de CMV [V]
Vectores impares V_1 , V_3 y V_5	$-V_{dc}/6$
Vectores pares V_2 , V_4 y V_6	$+V_{dc}/6$
Vector nulo V_0	$-V_{dc}/2$
Vector nulo V_7	$+V_{dc}/2$

Como consecuencia, las técnicas de modulación orientadas a reducir la CMV tratan de evitar estos vectores.

6.4.2 Técnicas de modulación para reducir la CMV

AZS-PWM

La técnica AZS-PWM es la técnica que más se asemeja a la modulación SV-PWM. La única diferencia es que el tiempo de aplicación del vector nulo se distribuye equitativamente entre dos vectores activos con fase opuesta [6], Figura 6-3(b). En cuanto a los vectores activos que forman V_{ref} , éstos se escogen de la misma forma que en la modulación SV-PWM, Figura 6-2(b).

En la modulación AZS-PWM, la secuencia de vectores puede variar, ya que no existe una única solución para escoger los vectores activos que sustituyen a los vectores nulos. Existen tres alternativas a la hora de combinar los vectores; AZS-PWM1, AZS-PWM2 y AZS-PWM3. En el caso de AZS-PWM1 y AZS-PWM2 se aprovecha uno de los vectores activos que forman V_{ref} como uno de los vectores activos que formará el vector nulo. En cambio, en la alternativa AZS-PWM3 se usan dos nuevos vectores activos para formar el vector nulo. A pesar de todo, las técnicas AZS-PWM1 y AZS-PWM2 requieren dos transiciones menos para completar la secuencia de vectores.

Las tres alternativas de la técnica AZS-PWM consiguen reducir la amplitud del CMV a dos valores de tensión: $V_{dc}/6$, $-V_{dc}/6$. Aunque como contrapartida se aumenta el rizado de la tensión en el condensador del bus y se aumenta la distorsión armónica de la corriente de salida [7].

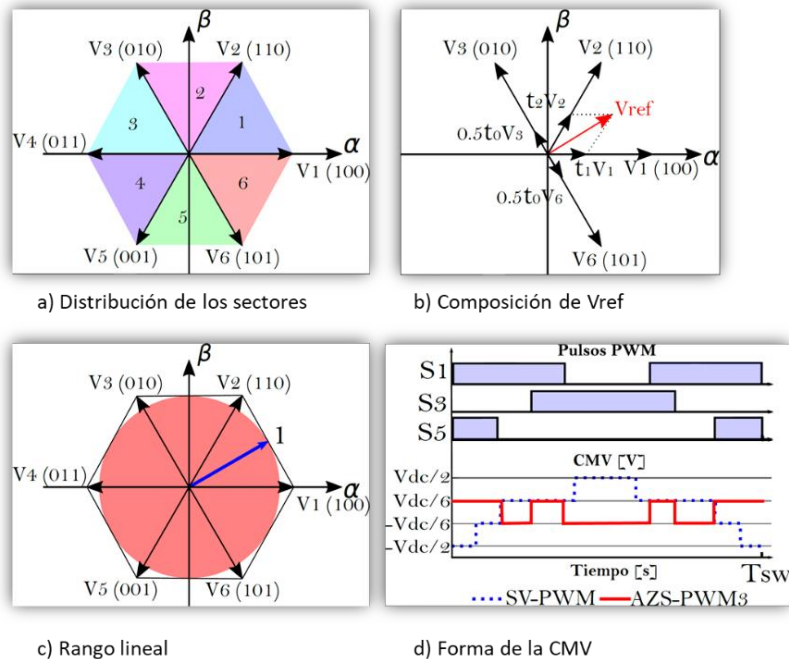


Figura 6-3: Características de la técnica AZS-PWM3

NS-PWM

Esta técnica utiliza tres vectores activos para crear la componente de tensión V_{ref} , Figura 6-4(b). El espacio vectorial está dividido en 6 sectores rotados treinta grados respecto al espacio vectorial del SV-PWM, Figura 6-4(a). Los vectores que forman la componente V_{ref} , se escogen tomando el vector más cercano al de referencia y sus adyacentes [6].

La modulación NS-PWM además de mejorar la tensión del modo común, también consigue disminuir las pérdidas de conmutación. En la técnica NS-PWM, no se aplican vectores nulos como en SV-PWM o AZS-PWM, si no que el tiempo de T_{sw} debe rellenarse con tres vectores activos.

Al igual que en AZS-PWM, en NS-PWM conseguimos disminuir la amplitud de la CMV a los valores de: $V_{dc}/6$ y $-V_{dc}/6$, Figura 6-4(d).

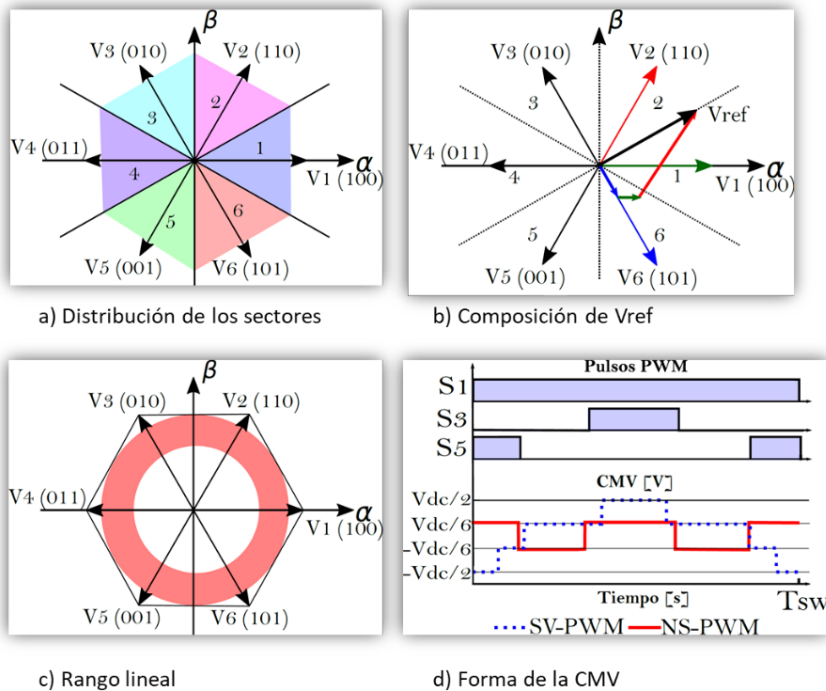


Figura 6-4: Características de la técnica NS-PWM

En la modulación NS-PWM, al evitar los vectores nulos y usar tres vectores adyacentes, el rango lineal se ve reducido considerablemente. Tomando como referencia la modulación AZS-PWM, el rango lineal de NS-PWM es: $0.67 \leq m \leq 1$ [20].

RS-PWM

La técnica RS-PWM, Figura 6-5, utiliza exclusivamente vectores pares o impares del espacio vectorial. El propósito de esta técnica es eliminar la frecuencia de la CMV (f_{VCM}) usando únicamente vectores que produzcan el mismo nivel de la CMV.

Su mayor desventaja es su rango lineal, ya que se ve reducido a $0 \leq m \leq 0.57$. A pesar de ello existe una variante llamada MRS-PWM que permite aumentar el rango lineal en un 16%. Esta técnica divide el espacio vectorial en 6 sectores y en cada sector alterna el uso de vectores pares e impares.

Con las técnicas RS-PWM y MRS-PWM se consigue una tensión del modo común constante con un valor de $V_{dc}/6$ o $-V_{dc}/6$ en función de si se escogen los vectores pares o impares. Por eso la modulación RS-PWM y sus variantes son la mejor opción para reducir la CMV, ya que reducen la f_{VCM} a 0.

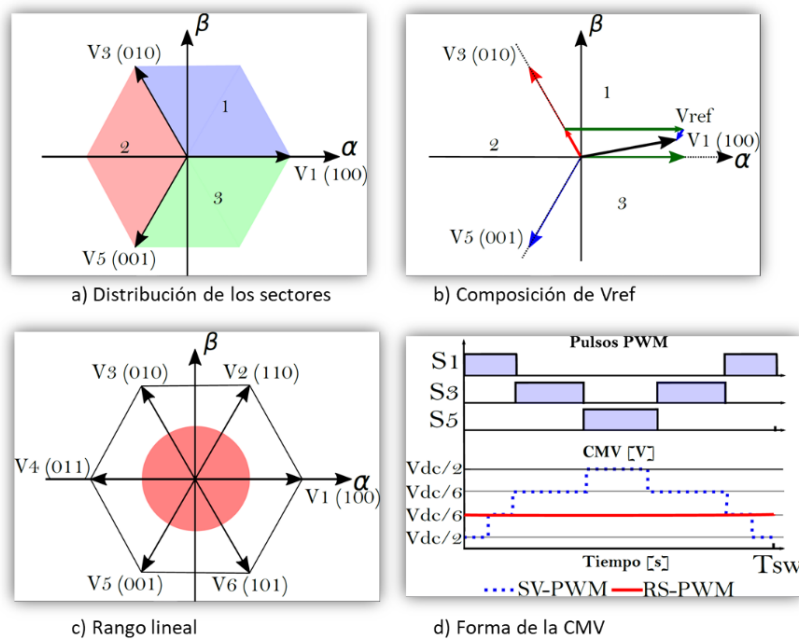


Figura 6-5: Características de la técnica RS-PWM

6.4.3 Comparativa

La modulación RS-PWM ha demostrado ser muy útil a la hora de reducir la CMV, pero con el inconveniente del aumento en las pérdidas del inversor, incluso cuando no se aplica corriente en el motor. Por otro lado, NS-PWM reduce las pérdidas de conmutación por ser una modulación discontinua, pero reduce la CMV en menor medida. Debido a los diferentes rangos lineales, RS-PWM es apropiada para ciclos de conducción urbanos (velocidades medias-bajas) y NS-PWM para ciclos extraurbanos (velocidades altas) [6].

La Tabla 6-2 muestra los niveles de CMV y frecuencia para cada una de las modulaciones analizadas en este apartado.

Tabla 6-2: Secuencia de vectores de las modulaciones trifásicas RCMV-PWM en el sector uno

Técnica de modulación	Secuencia de vectores	Conmutaciones por periodo	Niveles de la CMV [V]	f_{VCM} [Hz]
AZS-PWM1	1 2 4 2 1	6	$+\frac{V_{dc}}{6}y - \frac{V_{dc}}{6}$	$4f_{sw}$
AZS-PWM2	5 1 2 1 5	6	$+\frac{V_{dc}}{6}y - \frac{V_{dc}}{6}$	$2f_{sw}$
AZS-PWM3	6 1 2 3 2 1 6	6	$+\frac{V_{dc}}{6}y - \frac{V_{dc}}{6}$	$6f_{sw}$
NS-PWM	6 1 2 1 6	4	$+\frac{V_{dc}}{6}y - \frac{V_{dc}}{6}$	$4f_{sw}$
NS-PWM1	6 2 1 2 6	6	$+\frac{V_{dc}}{6}y - \frac{V_{dc}}{6}$	$2f_{sw}$
RS-PWM1	1 3 5 3 1	8	$-\frac{V_{dc}}{6}$	0

6.5 Técnicas de modulación para la reducción del CMV en multinivel

6.5.1 Introducción

El buen diseño de la estrategia de modulación en los convertidores de potencia es fundamental para obtener formas de onda de salida de alta calidad. Los inversores de dos niveles modulados en ancho de pulso (PWM), generan tensión de modo común de alta frecuencia con un alta (dv/dt). Del mismo modo, los esquemas de modulación de inversores multinivel comúnmente utilizados, también generan voltajes de modo común [11]. En general todas las técnicas de modulación tienen un objetivo, estos objetivos pueden ser, el de conseguir formas de onda con distorsión armónica baja, reducir al mínimo las pérdidas de conmutación en los dispositivos semiconductores o incluso eliminar la tensión del modo común.

Es posible eliminar la tensión del modo común empleando modulaciones y topologías pensadas específicamente para ello, pero como contrapartida, resultan ser menos eficientes en muchos otros aspectos, como, por ejemplo, un mayor rizado de las señales a la salida o un rendimiento menor del conjunto. Es así, que el equilibrio entre eficiencia, calidad y CMV se basa en encontrar modulaciones que consigan disminuir en gran medida la tensión del modo común, pero sin necesidad de eliminarla por completo, asegurándose siempre de que se consigue una baja THD.

Las modulaciones basadas en portadoras múltiples cumplen con estos requisitos y son fáciles de implementar en convertidores CHBC multinivel.

Otra de las técnicas punteras en reducción de CMV es la SV-PWM, la cual no es compatible con convertidores tipo CHBC, pero sí que consigue obtener muy buenos resultados en arquitecturas NPC y FCC.

6.5.2 La CMV cuando se usa SV-PWM

Entre varias técnicas de modulación para un convertidor multinivel, la modulación de ancho de pulso vectorial (SV-PWM) es una candidata atractiva. Utiliza directamente la variable de control dada por el sistema de control e identifica cada vector de conmutación como un punto en el espacio complejo (α , β). Es apto para la implementación del procesador de señal digital (DSP) y puede optimizar las secuencias de conmutación. El diagrama del vector espacial de cualquier convertidor de tres fases consta de seis sectores. Cada sector consta de $(n - 1)^2$ triángulos, donde n representa el número de niveles del convertidor, Figura 6-6. La punta del vector de referencia puede ubicarse dentro de cualquier triángulo. Cada vértice de cualquier triángulo representa un vector de conmutación. Un vector de conmutación representa uno o más estados de conmutación dependiendo de su ubicación. No hay tres estados de conmutación en el diagrama vectorial espacial del convertidor de nivel anual. El SV-PWM se realiza seleccionando y ejecutando adecuadamente los estados de conmutación del triángulo para los tiempos de encendido respectivos [19].

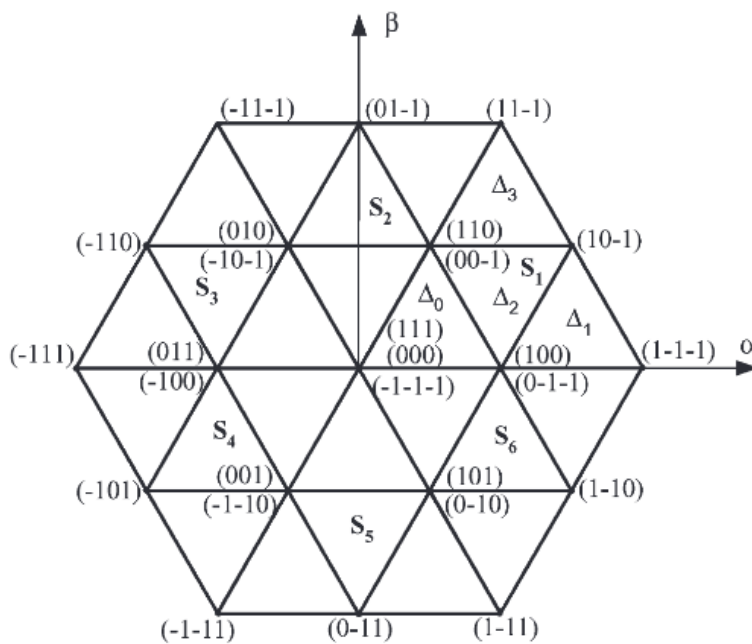


Figura 6-6: Diagrama espacio vectorial de un inversor de tres niveles [19]

La **Figura 6-6** muestra el diagrama del vector espacial de un inversor de tres niveles. Hay seis sectores (S_1-S_6), cuatro triángulos ($\Delta_0-\Delta_3$) en un sector y un total de 27 estados de conmutación en este diagrama de vectores espaciales. A medida que aumenta el nivel, aumenta el número de triángulos, estados de conmutación y cálculo de los tiempos de encendido. A todo eso hay que sumarle la complejidad de SV-PWM en convertidores multinivel [19].

La reducción de CMV se hace posible seleccionando vectores de voltaje cero adecuados para una duración específica y el uso de un conjunto seleccionado de vectores activos para la síntesis de voltaje de salida. No es fácil implementar la técnica SV-PWM en los convertidores CHBC, FCC

o NPC, de hecho, no se usa en estos convertidores. Existen otras alternativas basadas en convertidores híbridos que funcionan realmente bien y son capaces incluso de eliminar por completo la tensión de modo común cuando se usan con SV-PWM.

De todas formas, el uso de la modulación espacio vectorial queda limitada por el número de niveles del convertidor y por la capacidad computacional del procesador. Por lo tanto, queda descartado el uso de SV-PWM para la reducción del modo común en convertidores de más de tres niveles.

6.5.3 Técnicas de modulación para reducir la CMV

PD

La modulación PD (*Phase Disposition PWM*), es la más empleada de las tres técnicas, ya que es la que menos distorsión armónica genera.

En la modulación PD todas las $(n-1)$ portadoras están en fase para un convertidor de n niveles. En el caso de un convertidor de cinco niveles y tres fases tenemos cuatro portadoras y tres señales de referencia. Las cuatro portadoras están en fase y las tres señales de referencia se encuentran 120° desfasadas, Figura 6-7.

Cada una de las señales portadoras triangulares se compara con la señal sinusoidal de referencia. Si la señal de referencia es mayor que la señal portadora, entonces la señal de salida está en ON, de lo contrario se encuentra en OFF [8].

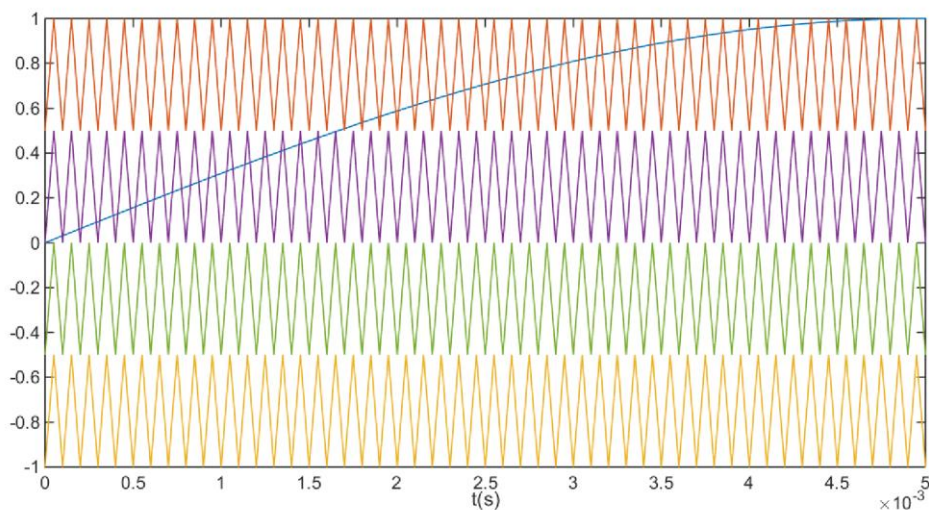


Figura 6-7: Principio de funcionamiento de la modulación PD-PWM. La señal de color azul es la referencia.

POD

La técnica de POD (*Phase Opposition Disposition PWM*) funciona de la misma manera que la modulación PD, pero en este caso las portadoras que están por encima de los 0 V se encuentran en fase y las que están por debajo de 0 V están desfasadas 180° , Figura 6-8.

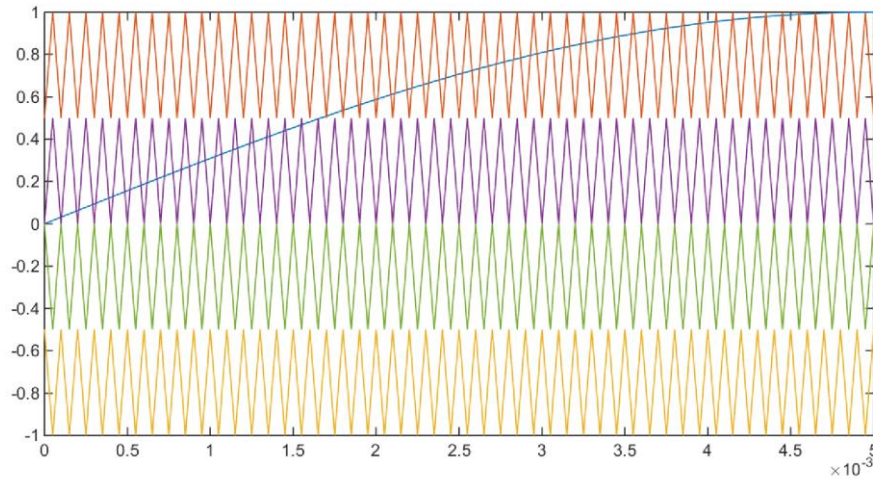


Figura 6-8: Principio de funcionamiento de la modulación POD-PWM. La señal de color azul es la referencia.

APOD

Existe otra técnica que funciona de la misma manera que las anteriores, a esta modulación se le llama APOD (*Alternate Phase Opposition Disposition PWM*). Mediante esta técnica usamos un total de $(n-1)$ portadoras para un inversor de n niveles las cuales están desfasadas de manera alterna 180° , Figura 6-9. Por ejemplo, en un convertidor de cinco niveles la portadora 1 está desfasada 180° de la 2 y la portadora 3 está desfasada 180° de la 4.

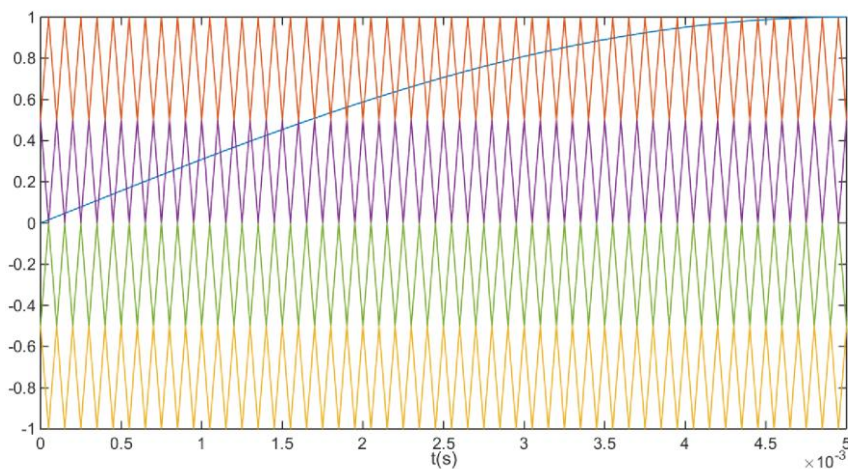


Figura 6-9: Principio de funcionamiento de la modulación APOD-PWM. La señal de color azul es la referencia.

7. Resultados de simulación

Todas las simulaciones se han realizado sobre modelos realistas creados en Matlab/Simulink. Para ello, se han utilizado algoritmos y bloques previamente modelizados por APERT, como puede ser el IGBT *AUIRGPS4067D1*, o el sistema de refrigeración del convertidor.

7.1 Modelos NPC

Los parámetros de simulación se recogen en la Tabla 7-1 de a continuación.

Tabla 7-1: *Parámetros de simulación de los modelos NPC*

Tensión batería	320 V
Carga	$R=1\ \Omega$; $L=10\text{ mH}$
Frecuencia fundamental	50 Hz
Frecuencia de conmutación	10000 Hz
Índice de modulación	0.8
IGBT	<i>AUIRGPS4067D1</i>

7.1.1 Convertidor NPC de tres niveles implementado mediante PWM

La Figura 7-1 muestra las señales generadas a la salida del convertidor cuando se emplea una modulación PWM en un NPC de tres niveles.

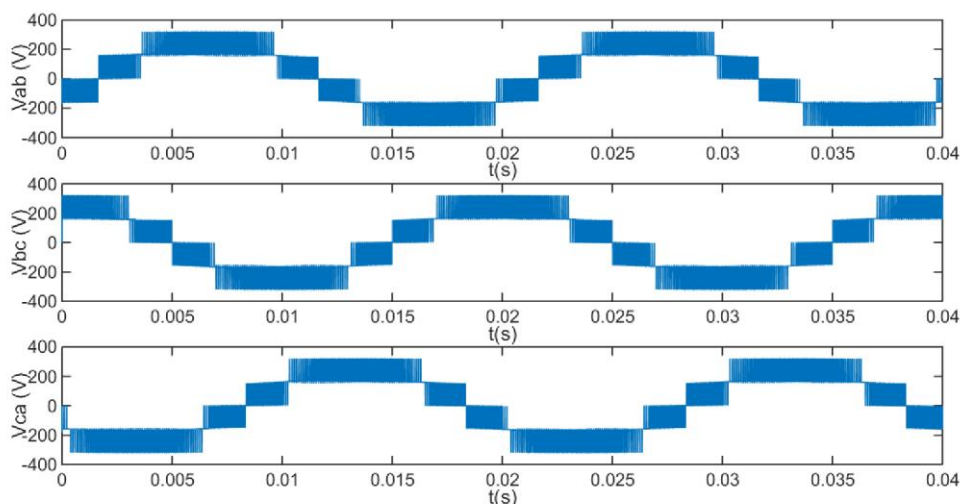


Figura 7-1: *Tensiones de línea en un NPC de tres niveles utilizando PWM*

La gráfica anterior enseña una señal escalonada que se mantiene en cada uno de sus niveles de tensión durante los tiempos de encendido. Esto quiere decir que el voltaje de salida no presenta picos de tensión y por lo tanto presenta cierta estabilidad.

El mayor pico de potencia disipada se produce durante los primeros instantes de funcionamiento del sistema, en concreto, durante el transitorio inicial. En la Figura 7-2 se puede ver cómo el sistema es capaz de estabilizar rápidamente el transitorio inicial y que las pérdidas se mantienen entre los 150 W y 250 W sin picos importantes.

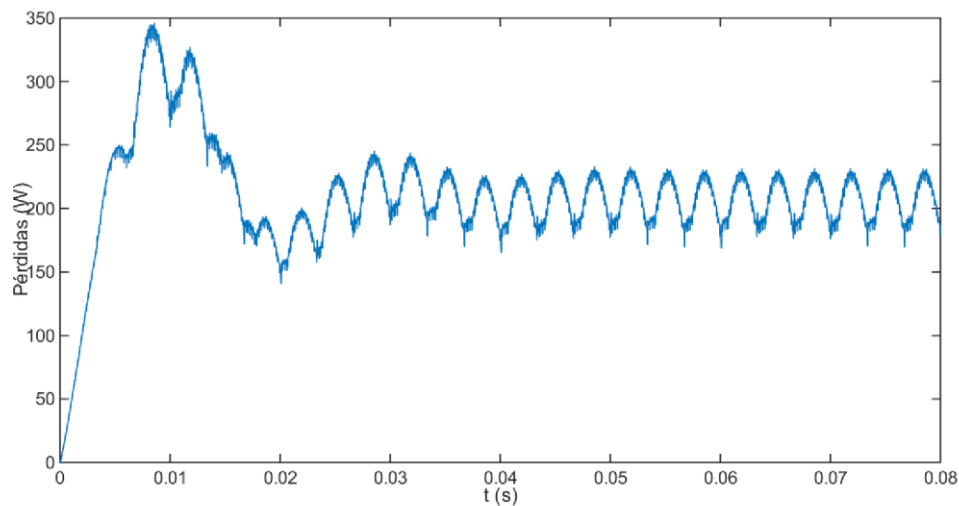


Figura 7-2: Potencia total disipada en un NPC de tres niveles utilizando PWM

Se obtiene una tensión de modo común con los siguientes valores, Figura 7-3:

$$\pm \frac{V_{DC}}{3} = \pm \frac{320}{3} = \pm 106.66 \text{ V}$$

$$\pm \frac{V_{DC}}{6} = \pm \frac{320}{6} = \pm 53.33 \text{ V}.$$

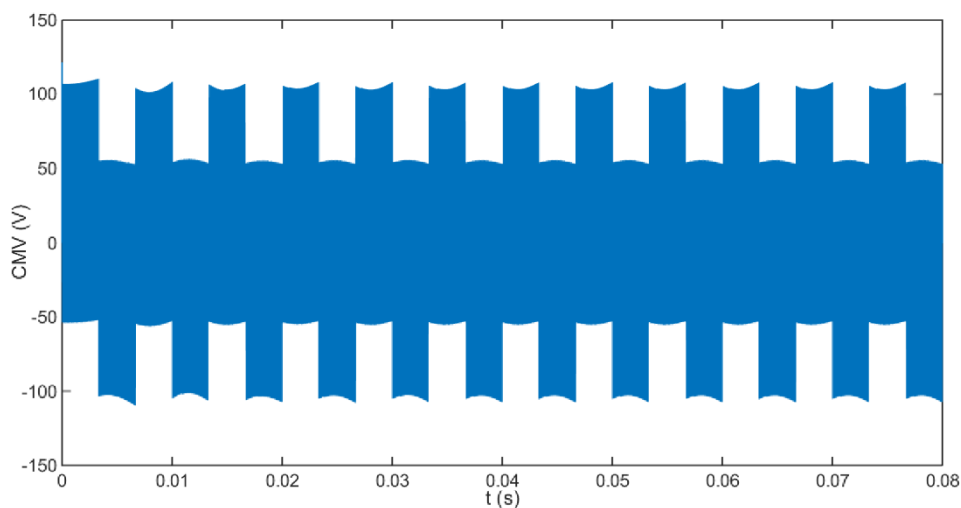


Figura 7-3: CMV en un NPC de tres niveles utilizando PWM

7.1.2 Convertidor NPC de tres niveles implementado mediante SV-PWM

En este caso, al igual que cuando se utiliza una modulación PWM, las tensiones de línea generadas se mantienen estables en sus correspondientes niveles, Figura 7-4.

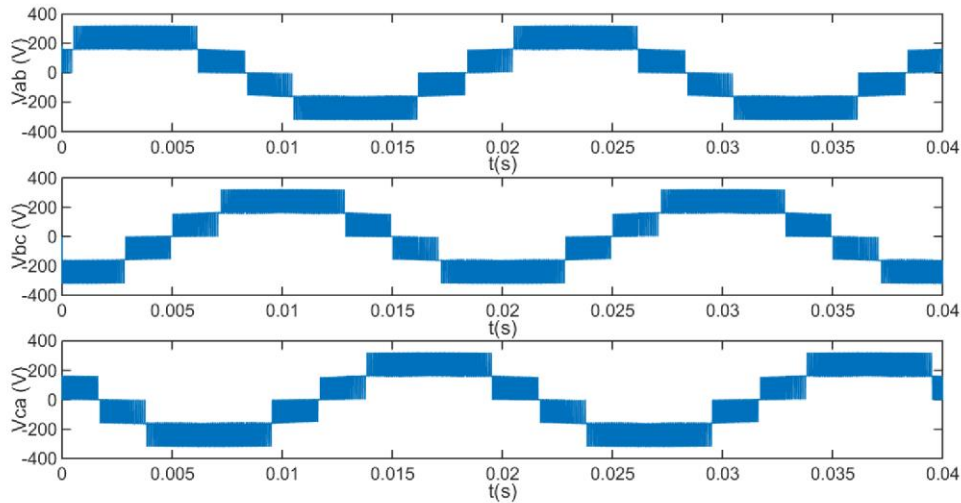


Figura 7-4: Tensiones de línea en un NPC de tres niveles utilizando SV-PWM

Sin embargo, como se puede observar en la Figura 7-5, cuando se usa SV-PWM se producen ciertos picos en las pérdidas del convertidor. En este caso los picos generados no suponen un problema grave para el convertidor.

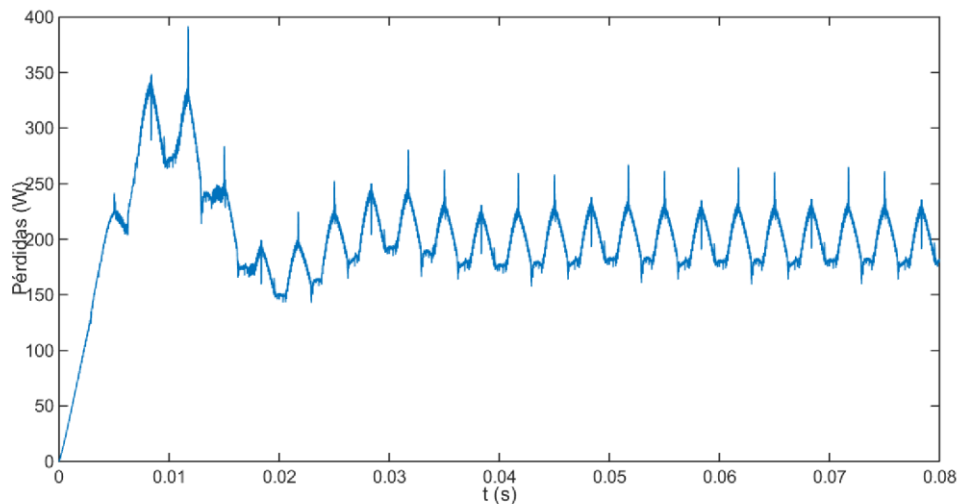


Figura 7-5: Potencia total disipada en un NPC de tres niveles utilizando SV-PWM

Para esta configuración también se obtiene la misma tensión de modo común que en el caso anterior, Figura 7-6:

$$\pm \frac{V_{DC}}{3} = \pm \frac{320}{3} = \pm 106.66 \text{ V}$$

$$\pm \frac{V_{DC}}{6} = \pm \frac{320}{6} = \pm 53.33 \text{ V.}$$

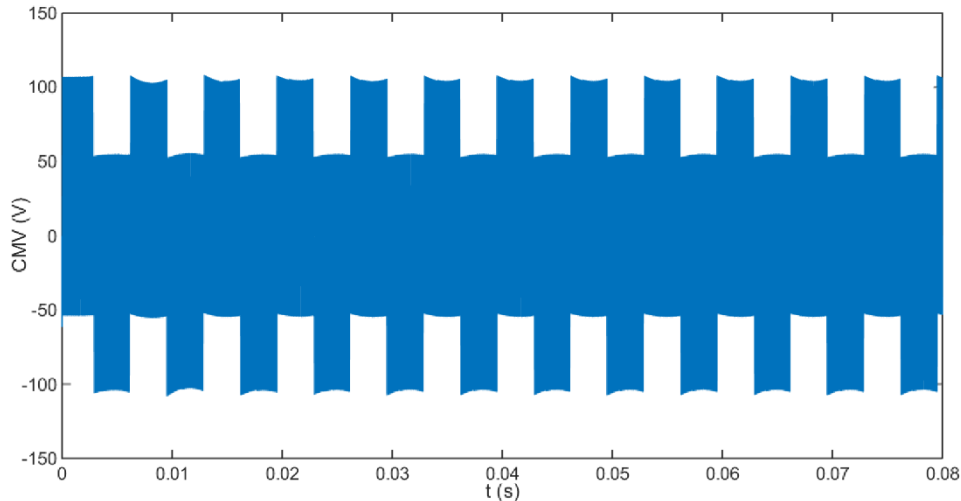


Figura 7-6: CMV en un NPC de tres niveles utilizando SV-PWM

7.2 Modelos CHBC

Los parámetros de simulación se recogen en la Tabla 7-2 **Tabla 7-1** de a continuación.

Tabla 7-2: Parámetros de simulación de los modelos CHBC

Tensión de las baterías	2 baterías de 100 V cada una
Carga	$R=1 \Omega$; $L=1 \text{ mH}$
Frecuencia de red	50 Hz
Frecuencia de conmutación	10000 Hz
Índice de modulación	1
IGBT	AUIRGPS4067D1

7.2.1 Convertidor CHBC de cinco niveles implementado mediante PD-PWM

Cuando se utiliza una modulación PD-PWM en un convertidor CHBC de cinco niveles es porque se quiere reducir drásticamente la distorsión armónica y la tensión de modo común. Las señales generadas presentan una excelente estabilidad en cada uno de sus cinco niveles. Mirando la Figura 7-7 se puede apreciar que la distorsión armónica en las tensiones de línea es mínima.

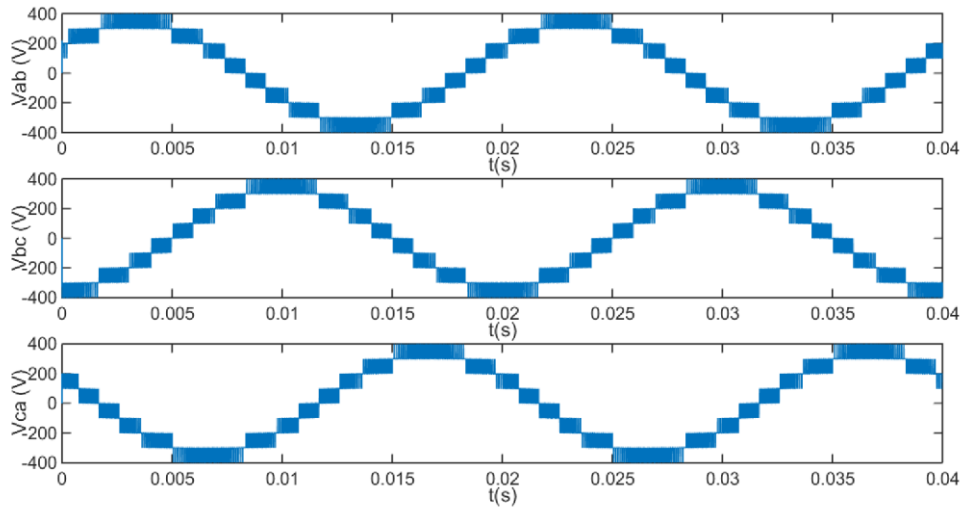


Figura 7-7: Tensiones de línea en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM

A diferencia de como ocurría en los NPC de tres niveles, para los convertidores en cascada de puente en H las pérdidas se estabilizan desde el principio sin necesidad de soportar ningún pico de potencia. La potencia disipada se mantiene entre los 2600 W y 2900 W. A mayor número de niveles y complejidad del convertidor mayor energía consumirá el sistema, Figura 7-8.

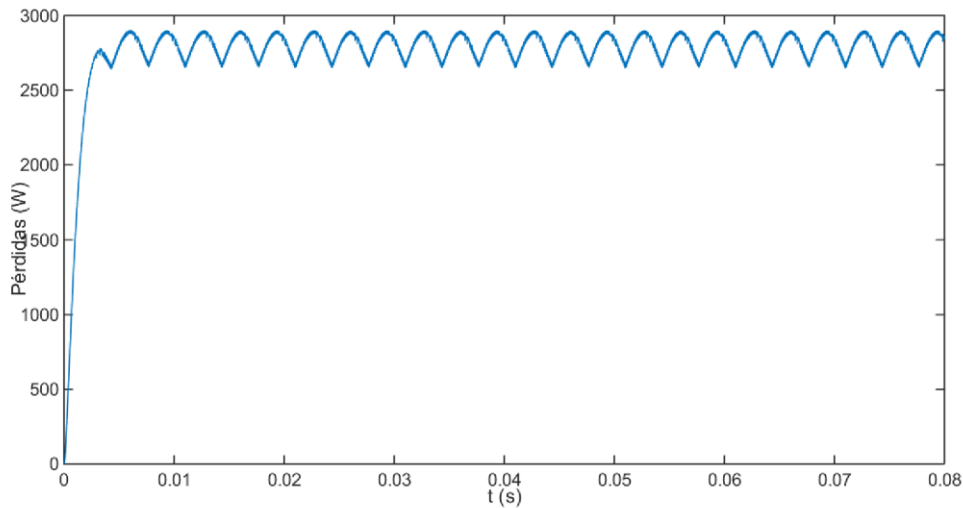


Figura 7-8: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM

Mediante la técnica PD-PWM no se consigue reducir en gran medida la tensión de modo común. De hecho, la CMV generada es mayor que cuando empleamos un convertidor NPC de tres niveles. La tensión obtenida oscila entre los siguientes valores, Figura 7-9:

$$\pm \frac{2V_{DC}}{3} = \pm \frac{2 \cdot 100}{3} = \pm 66.66 \text{ V}$$

$$\pm \frac{V_{DC}}{3} = \pm \frac{100}{3} = \pm 33.33 \text{ V.}$$

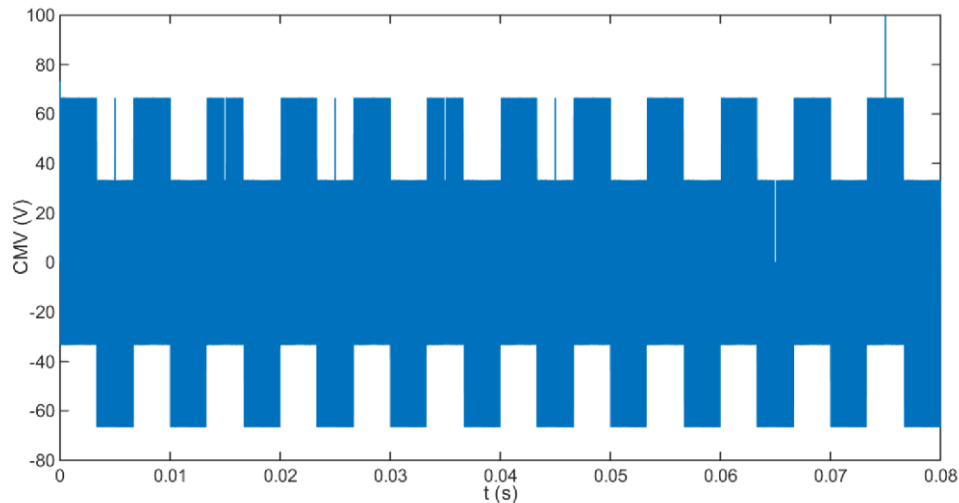


Figura 7-9: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando PD-PWM

7.2.2 Convertidor CHBC de cinco niveles implementado mediante POD-PWM

La modulación POD-PWM al igual que la PD-PWM, también pretende reducir la tensión de modo común. Con esta configuración sacrificamos parte de la calidad de las señales de salida para conseguir una mayor reducción del modo común. La calidad de las señales mostradas en la Figura 7-10 son de peor nivel en comparación con las vistas anteriormente en la Figura 7-7. A pesar de verse con una calidad inferior, la THD de la corriente inducida en el motor es de aproximadamente 0.29%. Por lo tanto, no deja de ser un valor muy reducido.

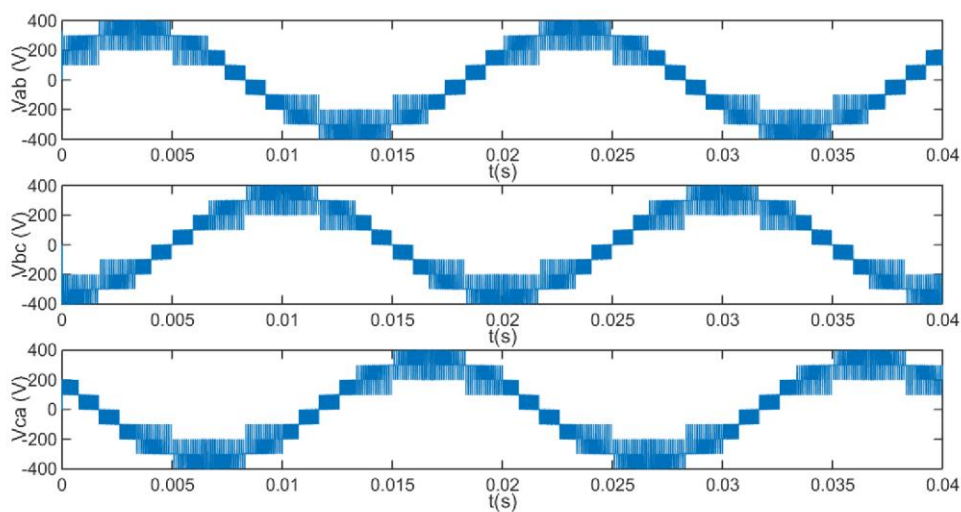


Figura 7-10: Tensiones de línea en un convertidor CHBC utilizando POD-PWM

Las pérdidas son idénticas que en el caso anterior. Esto se debe a que el mecanismo de funcionamiento las modulaciones empleadas son muy similares entre ellas, Figura 7-11.

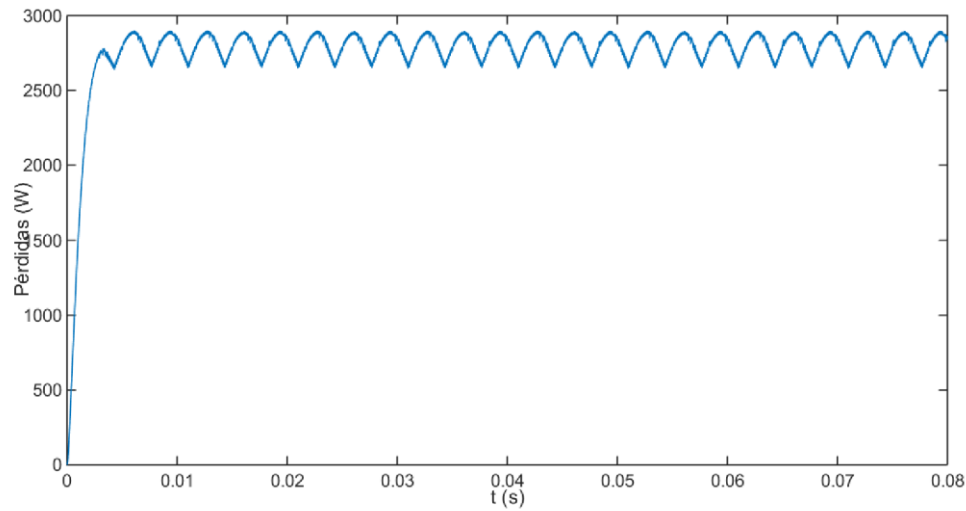


Figura 7-11: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM

Mediante la técnica POD-PWM se reduce significativamente la CMV, eliminando así la componente de tensión de $\pm \frac{2V_{DC}}{3}$.

La tensión obtenida oscila entre los siguientes valores, Figura 7-12:

$$CMV = \pm \frac{V_{DC}}{3} = \pm \frac{100}{3} = \pm 33.33 \text{ V.}$$

$$CMV = 0V.$$

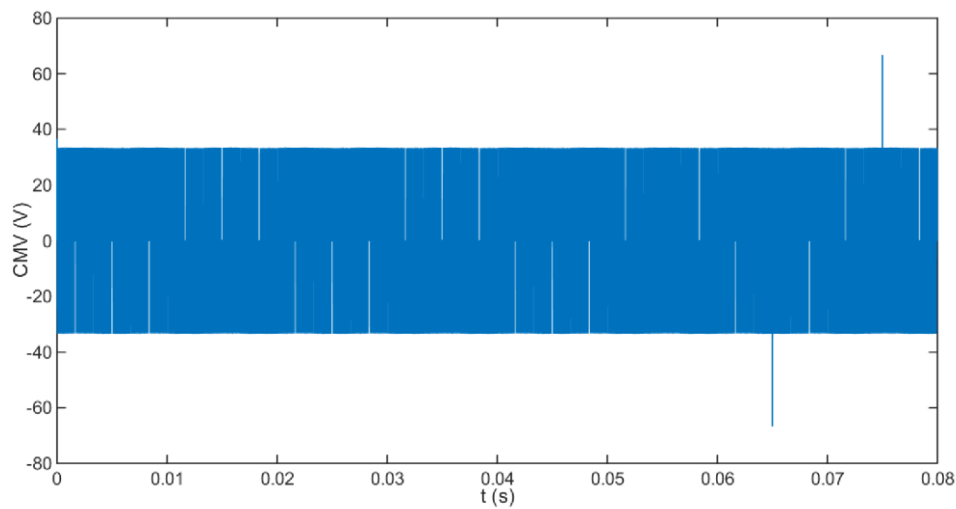


Figura 7-12: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM

En la **Figura 7-13**, se aprecian mejor dichos valores de tensión.

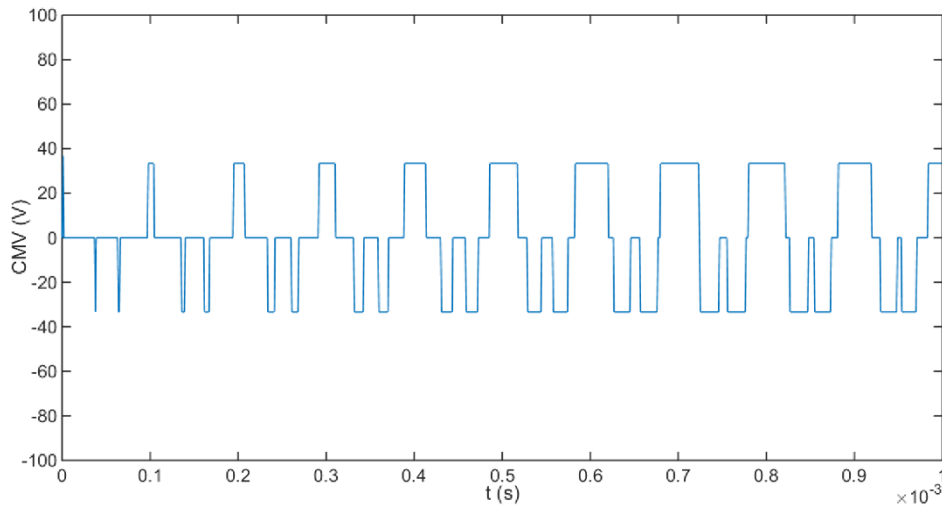


Figura 7-13: CMV ampliada en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando POD-PWM

7.2.3 Convertidor CHBC de cinco niveles implementado mediante APOD-PWM

Mediante la técnica APOD-PWM se generan tensiones de línea con mayor distorsión armónica que en el caso de PD-PWM y POD-PWM, Figura 7-14.

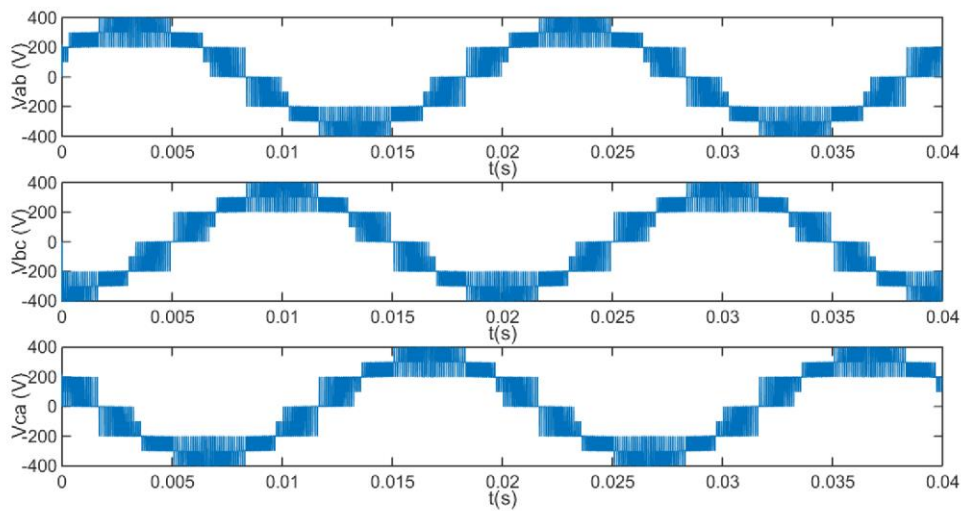


Figura 7-14: Tensiones de línea en un convertidor CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM

La Figura 7-15 demuestra que en esta ocasión las pérdidas generadas son similares a la de los casos anteriores.

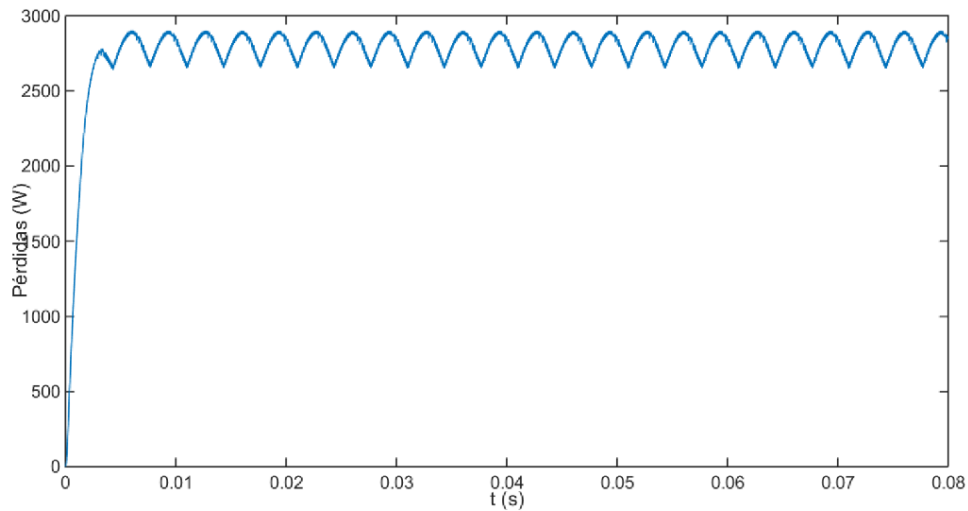


Figura 7-15: Potencia total disipada en CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM

Por último, cuando se emplea una técnica APOD-PWM se obtienen los mejores resultados respecto a la CMV. Tiene como desventaja que se generan ciertos picos de tensión con valor de $CMV = \pm \frac{2VDC}{3}$. Es capaz de mantenerse a 0V durante intervalos de tiempo mayores que en los demás casos. Los valores de tensión más repetidos son los siguientes, Figura 7-16:

$$CMV = \pm \frac{VDC}{3}$$

$$CMV = 0V$$

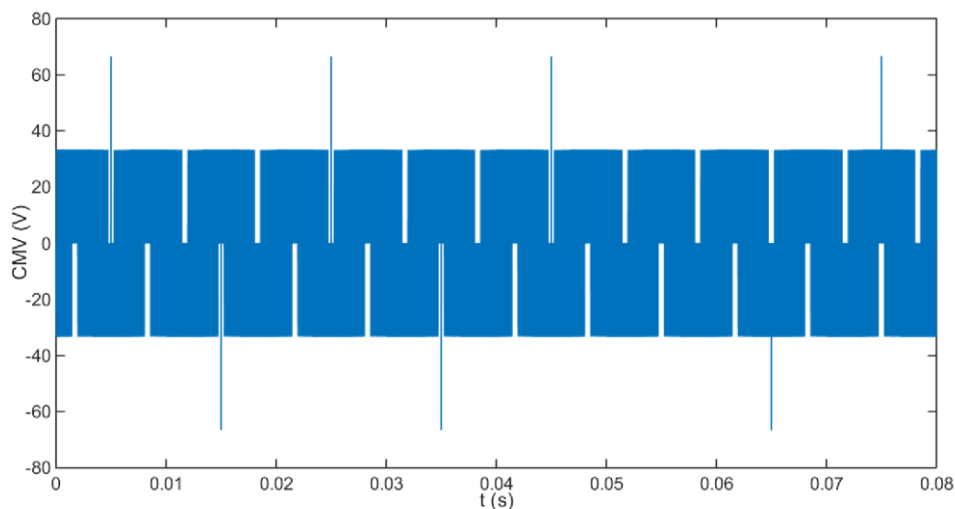


Figura 7-16: CMV en CHBC de cinco niveles utilizando APOD-PWM

7.3 Resumen de las simulaciones

Los resultados obtenidos anteriormente se pueden resumir en la Tabla 7-3:

Tabla 7-3: Tabla resumen de los resultados de las simulaciones

Convertidor	Número de niveles	Modulación	THD (%)	CMV (V)	Energía consumida en 0.08 segundos (Julios)
NPC	3	PWM	0.38	$(\frac{-V_{DC}}{3}, \frac{-V_{DC}}{6}, \frac{+V_{DC}}{6}, \frac{+V_{DC}}{3})$	182,16
NPC	3	SV-PWM	0.34	$(\frac{-V_{DC}}{3}, \frac{-V_{DC}}{6}, \frac{+V_{DC}}{6}, \frac{+V_{DC}}{3})$	180,89
CHBC	5	PD-PWM	0.19	$(\frac{-2V_{DC}}{3}, \frac{-V_{DC}}{3}, 0, \frac{+V_{DC}}{3}, \frac{+2V_{DC}}{3})$	221.27
CHBC	5	POD-PWM	0.29	$(\frac{-V_{DC}}{3}, 0, \frac{+V_{DC}}{3})$	221.27
CHBC	5	APOD-PWM	0.34	$(\frac{-2V_{DC}}{3}, \frac{-V_{DC}}{6}, 0, \frac{+V_{DC}}{6}, \frac{+2V_{DC}}{3})$	221.50

La distorsión armónica mostrada se corresponde con la corriente inducida en el motor.

8. Metodología seguida en el proyecto

8.1 Paquetes de trabajo

A continuación, se detallan los paquetes de trabajo del proyecto, así como los recursos utilizados. El proyecto se puede resumir en las siguientes 8 etapas:

1. P.T.1: Definición de los objetivos y alcance:

- Descripción: En esta fase se determinan los objetivos y el alcance del proyecto. Además, se establece la estructura del informe final y los puntos más importantes de los que se va a hablar.
- Objetivo: Establecer la base inicial del proyecto.
- Recursos: Ninguno

2. P.T.2: Formación:

- Descripción: En esta fase se adquieren los conocimientos para desenvolverse con los diferentes convertidores (Binivel y multinivel) y con técnicas de modulación nuevas. También será importante estudiar la “Tensión de modo común”. Para ello será fundamental controlar la herramienta “Matlab/Simulink”, porque será la plataforma donde se diseñen y simulen los modelos de convertidores.
- Objetivo: Entender el problema de la tensión de modo común y ser capaces de diseñar convertidores con sus modulaciones en Matlab/Simulink.

- Recursos: Documentos, artículos y tesis de IEEEEXPLORE. Documentación facilitada por APERT. Matlab/Simulink.

3. P.T.3: Desarrollo de convertidores VSC:

- Descripción: En este paquete de trabajo se diseñan los modelos de los convertidores NPC, FCC y CHBC para las topologías de dos niveles.
- Objetivo: Disponer de diferentes modelos en Simulink preparados para ser simulados.
- Recursos: Matlab/Simulink.

4. P.T.4: Simulación de convertidores VSC:

- Descripción: En esta fase se simulan los modelos anteriormente creados en el P.T.3.
- Objetivo: Obtener gráficas y datos de las simulaciones realizadas.
- Recursos: Matlab/Simulink.

5. P.T.5: Desarrollo de convertidores multinivel:

- Descripción: En este paquete de trabajo se diseñan los modelos de convertidores de 3 niveles para los NPC, FCC y CHBC. Por otra parte, se también se realiza un diseño de FCC y CHBC de 5 niveles, siendo el CHBC de 5 niveles la topología en la que más se va a profundizar.
- Objetivo: Disponer de diferentes modelos en Simulink preparados para ser simulados.
- Recursos: Matlab/Simulink.

6. P.T.6: Simulación de convertidores multinivel:

- Descripción: En esta fase se simulan los modelos anteriormente creados en el P.T.5.
- Objetivo: Obtener gráficas y datos de las simulaciones realizadas.
- Recursos: Matlab/Simulink.

7. P.T.7: Conclusiones:

- Descripción: Se extraen los resultados de las simulaciones realizadas en P.T.4 y P.T.6 y se comparan para sacar una serie de conclusiones.

- Objetivo: Demostrar cual es la mejor arquitectura (convertidor, modulación) para reducir el problema de la tensión de modo común manteniendo un excelente rendimiento.
- Recursos: Documentos de IEEEEXPLORE, documentación facilitada por APERT y simulaciones realizadas en Simulink.

8. P.T.8: Documentación:

- Descripción: Se escribe el informe final del trabajo fin de grado ajustándose a la estructura previamente establecida en el P.T.1.
- Objetivo: Redactar el trabajo fin de grado.
- Recursos: Paquete Microsoft Office (*Word, Excel, Proyect, Visio*).

8.2 Diagrama de Gantt

En la Figura 8-1 se aprecia el diagrama de Gantt del proyecto. Esto muestra las tareas enumeradas anteriormente, y puede ver cómo se han realizado estas tareas dependientes del tiempo. Dado que estas tareas se han realizado según lo planeado, se considera que la planificación ha sido correcta.

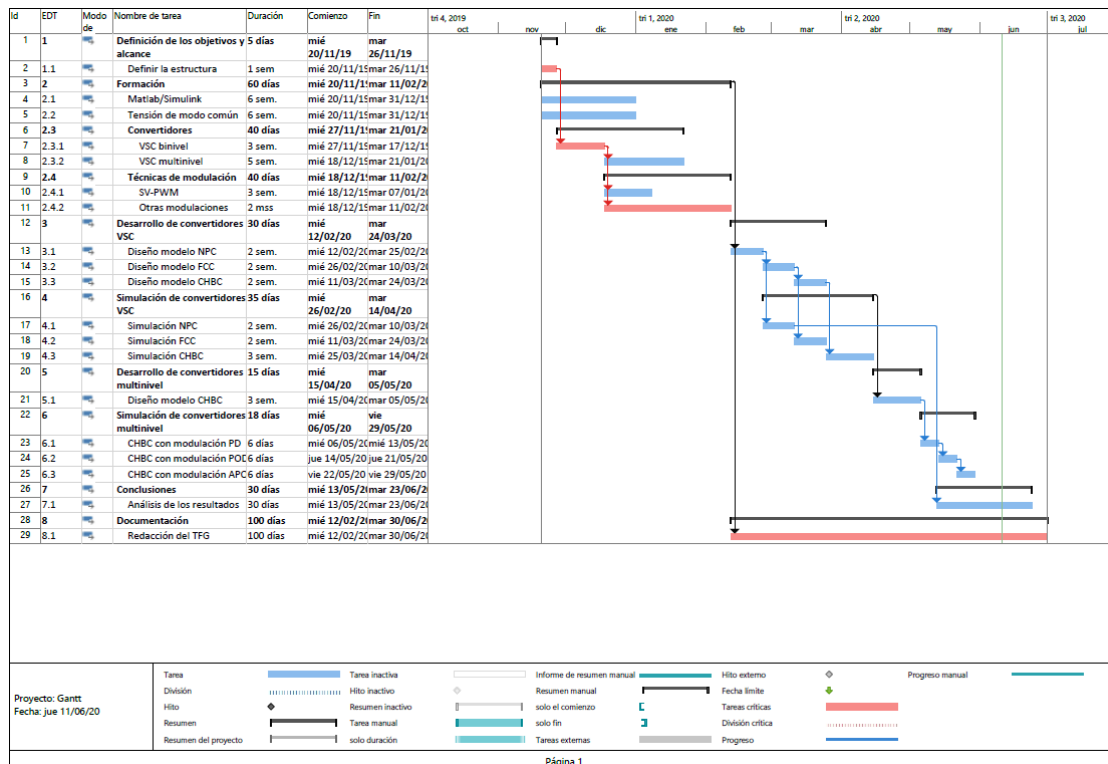


Figura 8-1: Diagrama de Gantt del proyecto

9. Presupuesto

9.1 Horas internas

Tabla 9-1: Partida horas internas del proyecto

Trabajadores	Tasa horaria(€/h)	Horas(h)	Coste
Director de proyecto	64	20	1.280,00 €
Ingeniero Técnico	30	160	4.800,00 €
Subtotal			6.080,00 €

9.2 Amortizaciones

Tabla 9-2: Partida amortizaciones del proyecto

Activo	Coste inicial	Vida útil(años)	Tiempo de uso(días)	Coste
Ordenador personal	1.000,00 €	6	160	73,06 €
Ordenador Laboratorio	800,00 €	4	90	49,32 €
Licencia Microsoft Office	160,00 €	1	100	43,84 €
Licencia Matlab/Simulink	1.980,00 €	3	160	289,32 €
Subtotal				455,53 €

9.3 Gastos

Tabla 9-3: Partida costes del proyecto

Nombre del gasto	Coste
Material laboratorio	
APERT	10,00 €
Subtotal	10,00 €

9.4 Presupuesto total del proyecto

Tabla 9-4: Presupuesto total del proyecto

Concepto	Coste
Horas internas	6.080,00 €
Amortizaciones	455,53 €
Gastos	10,00 €
Total	6.545,53 €

10. Conclusiones

Las interferencias electromagnéticas, el consumo de energía, la distorsión armónica y la tensión de modo común son algunos de los factores más importantes que determinan la calidad de un convertidor de potencia. Los convertidores de dos niveles son la solución más económica de todas. Las modulaciones RS-PWM y NS-PWM reducen considerablemente la tensión de modo común, pero además de aumentar las pérdidas del inversor, producen altos niveles de THD, EMI's que pueden mejorarse mediante el uso de convertidores multinivel. Es por esto, que los convertidores multinivel pueden ser candidatos para reemplazar al VSC binivel en un futuro próximo.

Por otra parte, como se ha explicado en anteriores apartados, existen numerosas arquitecturas de convertidores multinivel. Entre ellas destacan los convertidores NPC, FCC y CHBC. Los convertidores tipo NPC y FCC se enfocan más a aplicaciones de baja y media potencia, pero también pueden emplearse en vehículos eléctricos.

Los convertidores NPC de tres niveles son buena elección en aplicaciones que requieran de buen rendimiento y baja distorsión armónica. Sin embargo, los resultados en las simulaciones realizadas descartan el uso de convertidores NPC de tres niveles en el vehículo eléctrico, independientemente de la modulación utilizada. A pesar de su excelente rendimiento no son capaces de reducir en gran medida la tensión de modo común.

Se han estudiado tres modulaciones similares en convertidores CHCB de cinco niveles, todas ellas enfocadas a la reducción de la CMV. Mientras que la técnica PD-PWM no ha demostrado ser capaz de reducir en gran medida la CMV, la combinación de POD-PWM con un convertidor de puente H en cascada, ha resultado ser de lo más eficaz. Con una distorsión armónica del 0.29% y con una clara minimización de la CMV, el convertidor CHBC de cinco niveles acompañado de una modulación POD-PWM se posiciona como la mejor opción de las estudiadas en este trabajo. Una muy buena elección para todas las aplicaciones donde la fuente de energía del vehículo eléctrico esté compuesta por packs de baterías.

11. Bibliografía

- [1] "Control vectorial de inversores trifásicos 1". Salvador Seguí Chilet, Francisco J. Gimeno Sales, Rafael Masot Peris, Salvador Orts Grau. Departamento ingeniería electrónica Universidad Politécnica de Valencia. Página 2.
- [2] "APEC '98" Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition : conference proceedings 1998, February 15-19, 1998 "Multilevel Inverters, chapter 9". Página 406.
- [3] "Reviews on multilevel converter and modulation techniques". N. Rosmin. Centre of Electrical Energy Systems (CEES), Universiti teknologi Malaysia.
- [4] "Comparative analysis of harmonic reduction of VSI fed induction motor using SVPWM and sinusoidal PWM". Satya Prakash Jena. Kamallesh Chandra Rout. Dept. of Electrical Engg, College of Engineering & Technology, Bhubaneswar, India
- [5] "Control vectorial de inversores trifásicos 2". Salvador Seguí Chilet, Francisco J. Gimeno Sales, Rafael Masot Peris, Salvador Orts Grau. Departamento ingeniería electrónica Universidad Politécnica de Valencia. Página 2.
- [6] "Técnicas de modulación para la reducción de la tensión del modo común aplicadas al vehículo eléctrico". Markel Fernandez, Iñigo Kortabarria, Edorta Ibarra, Jon Andreu. Universidad del País Vasco.
- [7] H. Chen y H. Zhao, "Review on pulse-width modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage source inverters". IET Power Electronics, vol.9, no. 14, pp. 4490-4495, 2014.
- [8] Ali Osman Arslan, Fatih Eroğlu, Mehmet Kurtoglu, Ahmet Mete Vural. "Optimal Carrier Frequency Swapping for PD-PWM in Modular Multilevel Converter". Department of Electrical and Electronics Engineering. Turkey.
- [9] Endika Robles, Markel Fernandez, Edorta Ibarra, Jon Andreu, Iñigo Kortabarria, "Tensión de modo común en motores accionados mediante inversores: problemas y soluciones". Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- [10] Patel, D., Saravanakumar, R., Ray, K. K., & Ramesh, R. (2011). Design and implementation of three level CHB inverter with phase shifted SPWM using TMS320F24PQ. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010).
- [11] Haoran Zhang, Member, IEEE, Annette von Jouanne, Senior Member, IEEE, Shaoan Dai, Student Member, IEEE, Alan K. Wallace, Fellow, IEEE, and Fei Wang, Senior Member, IEEE. "Multilevel Inverter Modulation Schemes to Eliminate Common-Mode Voltages".

- [12] Khomfoi S, Tolvert L, (Chapter 17), Multilevel power converters. In: Khomfoi Surin, Tolbert Leon M. Editors. Power electronics handbook, Third Edition. Editor in chief is Muhammad H.Rashid. Amsterdam/Boston/ Heildemberg/ London/ New York/ Oxford/ París/ San Diego/ San Francisco/ Singapore/ Sydney/ Tokyo: Elsevier, Butterworth-Heinemann; 2011.
- [13] Le, Q. A., & Lee, D.-C. (2017). Reduction of Common-Mode Voltages for Five-Level Active NPC Inverters by the Space-Vector Modulation Technique. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2).
- [14] Wang M, Hu Y Zhao W. Application of modular multilevel converter in medium voltage high power permanent magnet synchronous generator wind energy conversion systems. IET Renew Power Gener 2016;10(6):824-33.
- [15] Ponnirani AB, Orikawa K, Itoh J. Minimum flying capacitor for N-level capacitor DC/DC boost converter. IEEE Trans Ind Appl 2016;52(4):3255-66.
- [16] Rahim NA, Elias MFM, Hew WP. Transistor-clamped H-bridge based cascaded multilevel inverter with new method of capacitor voltage balancing. IEEE Trans Ind Electron 2013;60(8):2943-56.
- [17] Alejandro Calle-Prado, Alepuz Salvador, Bordonau Josep, Cortes Patricio, Rodriguez Jose. Predictable control of a back-to-back NPC converter-based wind power system. IEEE Trans Ind Electron 2016;63(7):4615-27.
- [18] Najmi V, Jun W, Burgos R, Boroyevich D. Reliability-oriented switching frequency analysis for modular multilevel converter (MMC). In: Energy conversion congress and exposition (ECCE) IEEE; 2015.
- [19] Amit Kumar Gupta, Student Member, IEEE, and Ashwin M. Khambadkone, Senior Member, IEEE. "A Space Vector PWM Scheme for Multilevel Inverters Based on Two-Level Space Vector PWM".
- [20] H.Chen y H.Zhao, "Review on pulse-width modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters", IET Power Electronics, vol. 9, no, 14, pp. 2611-2620, 2016.